

Juan Carlos Santamarta Cerezal et al.

HIDROLOGÍA Y RECURSOS HÍDRICOS EN ISLAS Y TERRENOS VOLCÁNICOS

Métodos, Técnicas y Experiencias en las Islas Canarias



HIDROLOGÍA Y RECURSOS HÍDRICOS EN ISLAS Y TERRENOS VOLCÁNICOS

Métodos, Técnicas y Experiencias en las Islas Canarias

Juan Carlos Santamarta Cerezal

Et al.



HIDROLOGÍA Y RECURSOS HÍDRICOS EN ISLAS Y TERRENOS VOLCÁNICOS.
Métodos, técnicas y experiencias en las Islas Canarias.

DIRECCIÓN Y COORDINACIÓN EDITORIAL

Juan Carlos Santamarta Cerezal

jcsanta@ull.es

DISEÑO Y MAQUETACIÓN DE LA PORTADA

Alba Fuentes Porto

albfuentesporto@hotmail.com

EDITA:

Colegio de Ingenieros de Montes

Calle Cristóbal Bordiú, 19 28003 Madrid

915 34 60 05

DEPÓSITO LEGAL: TF 203-2013

ISBN: 978-84-616-3858-1

554 pp. ; 24 cm.

1ª Edición: Junio 2013

© Los Autores, Tenerife, 2013

Ninguna parte de este libro puede ser reproducida o transmitida en cualquier forma o por cualquier medio, electrónico o mecánico, incluido fotografías, grabación o por cualquier sistema de almacenar información sin el permiso escrito del autor y editores.

Contenido

PREÁMBULO	9
PRÓLOGO	13
RELACIÓN DE AUTORES	15
CAPÍTULO 1	
Los recursos hídricos y el paisaje Canario	17
1. Introducción	17
2. El agua en las sociedades prehispánicas	18
3. El agua en la nueva sociedad Castellana	25
CAPÍTULO 2	
Introducción a la cultura, historia y evolución del conocimiento del agua en Canarias	29
1. Introducción	29
2. Antecedentes históricos y consolidación de una singular cultura del agua	32
3. Evolución del conocimiento científico sobre el agua en las islas	37
CAPÍTULO 3	
Entorno geológico y materiales en las islas volcánicas. El archipiélago canario	49
1. Introducción	49
2. Origen de las Islas Canarias	51
3. Etapas de formación de las Islas Canarias	52
4. Materiales	54
5. Clasificación de los materiales volcánicos de Canarias	61
CAPÍTULO 4	
Hidrogeología y terrenos volcánicos	65
1. Introducción	65
2. Conceptos básicos	66
3. Aspectos hidrogeológicos del volcanismo	78
4. La hidrogeología de los terrenos volcánicos	79
5. Las aguas subterráneas en Canarias	86

CAPÍTULO 5

Métodos de estudio hidrogeológicos e hidrogeoquímicos 93

1. Introducción	93
2. Recursos y reservas de agua subterránea	94
3. Papel de las aguas subterráneas en la naturaleza y para usos humanos	95
4. Reconocimiento de la geometría y piezometría de los sistemas acuíferos	96
5. Métodos de construcción de captaciones	99
6. Métodos hidrodinámicos de estudio	102
7. Métodos de evaluación de la recarga	105
8. Evaluación de las descargas	111
9. Métodos hidrogeoquímicos	112
10. Métodos isotópicos ambientales	118
11. Métodos de trazadores artificiales	123
12. Métodos asociados a la calidad y la contaminación	124
13. Efectos de la explotación intensiva del agua subterránea	127
14. Métodos de planificación, gestión y administración	129
15. Consideración metodológica del cambio climático y global	131

CAPÍTULO 6

Hidrología superficial en islas y terrenos volcánicos 135

1. Introducción	135
2. Importancia de la hidrología insular	137
3. Descripción de las cuencas y red hidrográfica	138
4. Tipos de suelos volcánicos	140
5. Hidrometeorología, estudio de parámetros hidrológicos	142
6. Barrancos y cuencas volcánicas	144
7. Arrastre de materiales, procesos de erosión hídrica	152
8. Análisis de avenidas. Recomendaciones para un terreno volcánico	155

CAPÍTULO 7

Aprovechamientos de los recursos hídricos superficiales en un medio insular y volcánico 157

1. Introducción	157
2. Descripción de las cuencas y la red hidrográfica	158
3. Obras hidráulicas superficiales en medios volcánicos	160

CAPÍTULO 8

Construcción de Grandes Presas en las Islas Canarias 183

1. Introducción	183
2. Diseño y construcción de las presas canarias	185
3. Patrimonio Histórico de Canarias	196

CAPÍTULO 9

La infiltración en suelos volcánicos 199

1. Introducción	199
2. Factores que influyen en la infiltración del agua en el suelo	200
3. Características de los suelos de Tenerife	204
4. Distribución de los órdenes de suelos en la isla	208
5. Métodos para el estudio de la infiltración	210
6. La infiltración de los suelos. Estudio en zonas llanas	214
7. Distribución de la velocidad de infiltración de los suelos de Tenerife	218
8. Efecto de la pendiente en la infiltración del agua en el suelo	221

CAPÍTULO 10

Aprovechamientos hídricos subterráneos en islas volcánicas. Minería del agua 227

1. Introducción	227
2. Recursos Hídricos subterráneos en Canarias	228
3. Factores geológicos y materiales volcánicos	229
4. Minería del agua dulce	232
5. Sistemas de avance	234
6. Explosivos	238
7. Innovaciones constructivas	240
8. Rendimientos y costes	242
9. Conclusiones sobre la minería del agua	243
10. El pozo Canario	244
11. Sondeos	245

CAPÍTULO 11

El transporte hidráulico 251

1. Introducción	251
2. Arquitecturas hidráulicas de captación y conducción: madres, azudes, acequias y canales	252
3. Estrategias y arquitecturas hidráulicas para gestionar y aforar los caudales	259
4. Nuevas tecnologías para el transporte de aguas	263

CAPÍTULO 12

Binomio Agua y Energía. Aprovechamientos hidroeléctricos en medios insulares 269

1. Introducción a los recursos energéticos de Canarias	269
2. Binomio agua y energía en medios insulares	271
3. Suministro energético en medios insulares	273
4. Estrategias históricas para aprovechar la energía hidráulica	277
5. Proyectos de I+D vinculados al binomio agua y energía	290
6. Futuros proyectos hidroeléctricos en las islas Canarias	291

CAPÍTULO 13

Depuración de aguas en medios insulares	297
1. Introducción	297
2. Breve reseña histórica	298
3. Las tecnologías de depuración y regeneración de aguas residuales	300
4. Aplicación de los usos del agua al caso concreto de Santa Cruz de Tenerife	303
5. La depuración en Canarias	306

CAPÍTULO 14

Reactores biológicos para regenerar aguas residuales	315
1. Introducción	315
2. Notas históricas sobre la evacuación y la depuración de las aguas residuales urbanas	315
3. El tratamiento convencional de las aguas residuales	317
4. Los reactores biológicos	320
5. Depuración y Regeneración	325
6. Las nuevas tecnologías: reactores biológicos de membranas (RBM)	326
7. Los reactores biológicos de cultivo fijo: las biopelículas	330

CAPÍTULO 15

La problemática del flúor en las aguas de la isla de Tenerife. Evaluación del riesgo tóxico	337
1. Introducción	337
2. Análisis del riesgo	344
3. Evaluación del riesgo	345

CAPÍTULO 16

El aprovechamiento del agua en los agrosistemas tradicionales canarios. Comparación con otros territorios	353
1. Introducción	353
2. Agrosistemas Canarios	356
3. Sistemas de conservación de suelos en Oriente Próximo, comparación con las técnicas usadas en las islas Canarias	367
4. Cultivos andinos	372

CAPÍTULO 17

Construcción de obras y aprovechamientos hidráulicos en terrenos e islas volcánicas. Ingeniería geológica y geotécnica	377
1. Introducción	377
2. Unidades geotécnicas y problemas asociados	378
3. Aspectos geotécnicos en las minas o galerías de agua en terrenos volcánicos	390

CAPÍTULO 18

Obras hidráulicas y materiales constructivos en terrenos e islas volcánicas.

El ejemplo canario

399

- | | |
|---|-----|
| 1. Introducción, los materiales constructivos utilizados en Canarias | 399 |
| 2. Materiales tradicionales canarios de construcción para obras hidráulicas tradicionales | 401 |

CAPÍTULO 19

Gestión y planificación de los recursos hídricos en los sistemas insulares

de la Macaronesia. La singularidad canaria

409

- | | |
|--|-----|
| 1. Los tipos de sistemas insulares | 409 |
| 2. Disponibilidad de recursos hídricos en una isla | 411 |
| 3. Limitaciones de un sistema archipiélago en relación a sus recursos hídricos | 413 |
| 4. La planificación del agua en Canarias | 414 |
| 5. Introducción a los recursos hídricos en la Macaronesia | 417 |
| 6. El coste del agua en Canarias | 422 |
| 7. El coste del agua urbano | 424 |
| 8. Los recursos no convencionales en la planificación hidrológica canaria | 427 |
| 9. Una peculiar singularidad:
la gestión tradicional del agua en Canarias a lo largo de la historia | 428 |

CAPÍTULO 20

Patrimonio Hidráulico Canario

433

- | | |
|---|-----|
| 1. Introducción al Patrimonio Hidráulico | 433 |
| 2. Obras hidráulicas de almacenamiento y regulación antiguas | 434 |
| 3. Nuevas obras hidráulicas (siglos XIX y XX) | 447 |
| 4. Industria extractiva del hielo canario: los neveros | 464 |
| 5. Fuentes agrias y termales | 472 |
| 6. Patrimonio Hidráulico en Canarias.
Cultura, gestión patrimonial, implicaciones didácticas e investigación | 475 |

CAPÍTULO 21

Arquitectura hidráulica doméstica

489

- | | |
|--|-----|
| 1. Introducción | 489 |
| 2. Eres y fuentes sagradas | 489 |
| 3. Fuentes públicas, pilares y chorros | 490 |
| 4. Lavaderos | 491 |
| 5. Piletas y dornajos | 493 |
| 6. Destiladera o pila | 495 |

CAPÍTULO 22

Hidrometeorología en las islas Canarias I. Estudio de precipitaciones **499**

1. Introducción climática de la meteorología de las islas Canarias	499
2. Estaciones pluviométricas de Tenerife	500
3. Pluviómetros de la red climática	502
4. Precipitaciones medias estacionales y anuales	505
5. Distribución de las precipitaciones medias trimestrales y anuales	508
6. Precipitaciones débiles en la costa y medianía. Los alisios	513
7. Presión atmosférica sobre la superficie del mar	515
8. Rosas de velocidad del viento y humedad relativa del aire	518
9. Radiosondeo en un día típico de vientos alisios	521

CAPÍTULO 23

Hidrometeorología en las islas Canarias II. Situaciones extremas **525**

1. Invasiones de aire polar marítimo. Frente polar	525
2. Borrascas extratropicales o borrascas atlánticas en las islas Canarias	531
3. La gota fría	537

RELACIÓN DE AUTORES **547**

Preámbulo

Juan Carlos Santamarta

A raíz de la presentación de mi tesis doctoral, sobre las singularidades de los recursos hídricos y la ingeniería del terreno en las islas y regiones volcánicas, me planteé desarrollar un libro que estudiara en profundidad todos los elementos del ciclo integral del agua en una isla volcánica que pudiera ser utilizado en otras regiones del mundo. Al comprobar la complejidad del tema elegido, la historia y la interdisciplinariedad que tiene la cultura del agua en nuestras islas, decidí contar con una serie de amigos y compañeros para completar una obra con el fin de que fuera un referente para todos aquellos, estudiantes, profesionales, comunidad científica o cualquier persona interesada, que quisiera acercarse e introducirse en el apasionante mundo del agua en Canarias.

En el presente libro, he intentado que estuvieran reflejadas todas las disciplinas posibles relacionadas con el agua, partiendo, desde la historia desde los primeros pobladores de las islas, hasta la actualidad, pasando por los sistemas tradicionales de aprovechamiento, hasta las nuevas tecnologías y tratamientos relacionados con el agua y su gestión.

La obra se divide en 23 capítulos, comenzando con la relación con el agua de los pobladores pre-hispánicos en las islas, seguidamente se analiza la evolución histórica de los recursos hídricos y su aprovechamiento a lo largo de la historia de las islas hasta los tiempos actuales. Ya, en los capítulos más técnicos e ingenieriles del libro se analiza inicialmente la geología y el vulcanismo singular de las islas volcánicas en general y en Canarias en particular seguido de los aspectos fundamentales de la hidrogeología particularizando, para los terrenos volcánicos y sus métodos de estudio.

En capítulos posteriores se analiza hidrológicamente, parámetro por parámetro, las singularidades del ciclo hidrológico en una isla volcánica, infiltración, escorrentía, erosión hídrica hasta llegar a los capítulos referidos a su aprovechamiento; tanto subterráneo como superficial, partiendo de las galerías o minas de agua, tan características en el archipiélago canario y singulares a nivel mundial, sin olvidarse

posteriormente, de los aprovechamientos superficiales en forma de presas, balsas y los sistemas tradicionales como las gaviás, maretas, arenados etc..

Una vez analizados los sistemas de captación y aprovechamiento el libro se centra en el transporte de las aguas y su gestión en un medio insular contemplando toda la región de la Macaronesia y algún que otro sistema insular como Hawái o Sicilia. En la parte de tratamientos e hidroquímica del agua se ha contemplado dedicar varios capítulos a la calidad de las aguas, destacando los problemas con el flúor y a la depuración de aguas sobre todo las tecnologías de membranas y sus posibilidades en el archipiélago. También en la presente obra se destaca la importancia del binomio agua y energía, vinculando todo proceso relacionado con el alumbramiento y producción industrial de aguas con la demanda energética.

Transversalmente y como técnicas auxiliares se introduce al lector en la singularidades que presentan los terrenos y materiales volcánicos, sobre todo a nivel geotécnico así como la evolución del uso de materiales para la construcción de obras hidráulicas.

También se hace referencia a aspectos patrimoniales que presenta la cultura del agua en Canarias, sus rasgos singulares, el conocimiento científico, la etnografía... incluyendo las arquitecturas hidráulicas individuales que han hecho los habitantes a modo particular, para el aprovechamiento del agua y que han sido exportadas a numerosas partes del mundo como Cuba, Venezuela...

El libro finaliza con un profundo estudio de la hidrometeorología de las islas por un lado estudiando las precipitaciones de la isla de Tenerife y por otro analizando los aspectos singulares y climáticos de las Islas Canarias en general.

Quiero agradecer desde aquí a todos los amigos y maestros del agua, de los cuales he aprendido muchas cosas que desconocía y, debo también agradecerles el haberme acompañado en este viaje formativo y personal, estos son; el profesor de la UPM, Florentino Santos García, al que le debo ser Doctor Ingeniero, Fermín Villarroya de la UCM; Eustaquio Villalba, Jaime González y Francisco Suarez Moreno, por hacerme ver el agua desde una perspectiva histórica y social que hasta ahora desconocía; también quiero tener palabras de agradecimiento a Emilio Custodio y Carmen Cabera de la ULPGC por su apoyo y, por estar siempre disponibles para impartir charlas y cursos sobre la hidrogeología de Canarias, debo recordar a mi compañero de grupo de investigación, Luis Enrique Hernández Gutiérrez por sus grandes aportaciones en geología y geotecnia, Luis Manuel Pérez Santana por todas

sus aportaciones en meteorología de las islas y por último a Enrique Orche por sus consejos y servirme de modelo académico.

Quiero agradecer a la empresa TAGUA SA, su apoyo incondicional en todas las actividades tanto investigadoras como divulgativas que realizamos sobre la técnica y el aprovechamiento del agua en Canarias, en particular a su gerente; Luis González Sosa, más aún en el periodo de crisis que atravesamos, es de agradecer su esfuerzo y apuesta decidida por el I+D+i+d del agua.

A nivel personal me gustaría recordar a mi padre Fausto Santamarta, recientemente fallecido, algunos capítulos de este libro los acabé con Él a mi lado en una habitación de hospital. Y por su puesto a todos aquellos que me acompañan en mi día a día; Lucila Cerezal, mi hermano José Manuel y sobrinos, Jesica, Miguel Ángel, Alberto, Joaquín y Javier.

JUAN CARLOS SANTAMARTA CEREZAL
Doctor Ingeniero Civil en Hidráulica y Energética por la UPM
Ingeniero de Montes (UPM)
Ingeniero Civil (ULPGC)
Ingeniero Técnico de Minas (UPM)
jcsanta@ull.es

En San Cristóbal de La Laguna, Tenerife, Islas Canarias
a 31 de enero de 2013

Prólogo

TAGUA

El pasado y el presente de las Islas Canarias no podría explicarse de forma completa sin una aproximación a la cultura del agua desarrollada en este archipiélago, que a pesar de la heterogeneidad de sus siete territorios ha sabido conjugar el conocimiento popular, la investigación científica y la aplicación de muy diversas técnicas que aseguraron desde sus orígenes el acceso de sus pobladores a tan preciado y escaso recurso.

Las variadas disciplinas desde las que se analizan todos los aspectos relativos al agua convierten a las Islas Canarias en un laboratorio del conocimiento y la ciencia aplicada al agua. La existencia de ese binomio *-conocimiento y ciencia-* ha hecho posible el desarrollo social y económico experimentado por los pujantes sectores de la agricultura y el turismo, satisfaciendo sus demandas de recursos hídricos en un territorio en el que escasean.

Esta obra pretende hacer un compendio de las particularidades de los territorios archipelágicos de origen volcánico y la gestión sostenible del ciclo integral del agua. Es una publicación tratada con rigurosidad e indispensable para quienes tengan la inquietud de acercarse al conocimiento y gestión de los recursos hídricos en general, y de forma muy particular, la relativa a territorios sin conexión a las aguas continentales.

Desde esa perspectiva y gracias a la colaboración de un equipo de expertos que aportan su conocimiento, las páginas de este libro permitirán al lector conocer de un modo global el mundo del agua desde muy diversas disciplinas científicas, convirtiéndolo en un manual de consulta indispensable y de extraordinaria utilidad.

TAGUA

Obras y Servicios para el agua

Dirección y coordinación editorial

Juan Carlos Santamarta Cerezal

Relación de autores

María del Carmen Cabrera Santana

Emilio Custodio Gimena

Sebastián N. Delgado Díaz

Jaime J. González González

Arturo Hardisson de la Torre

Luis Enrique Hernández Gutiérrez

Cintia Hernández Sánchez

Carmen Concepción Jiménez Mendoza

Jonay Neris Tomé

José Antonio Rodríguez Losada

Jésica Rodríguez Martín

Juan Carlos Santamarta Cerezal

Luis Manuel Santana Pérez

Francisco Suárez Moreno

Amanhuy Suárez Pérez

Marisa Tejedor Salguero



Los recursos hídricos y el paisaje Canario

Eustaquio Villalba Moreno

1. Introducción

El concepto de paisaje es difuso, no tiene unos límites claros y su análisis depende de la escala del territorio analizado. Los elementos claves que definen y explican la evolución del paisaje varían en función de los aumentos de la lupa usada en el estudio. En Canarias, los análisis que abarcan el conjunto del archipiélago son útiles para explicar los factores naturales, como la evolución geomorfológica, climática o los ecosistemas que sustentan. La escala archipelágica es la adecuada para todo lo relacionado con la localización, la accesibilidad entre las islas y con el exterior. Otros elementos quedan subordinados, pierden importancia explicativa a esta escala, en concreto, los derivados de la acción humana y su impacto en el territorio.

El segundo nivel de análisis, el de isla; es el adecuado para estudiar el papel que ha jugado el agua en la evolución de sus formas de relieve -ámbito de la geografía física- y en las transformaciones producidas desde el arribo de los primeros pobladores a las islas.

La disponibilidad de agua es el factor clave para poder comprender los paisajes, pues es su elemento más definitorio, el que le da posibilidad de cambio y, por tanto, de formas diferenciadas. Es el agua la que modela el relieve, la que esculpe las formas de los paisajes transformados por el hombre. Incluso, el territorio recién creado

por una erupción no es otra cosa que la materia prima sobre la que el agua, con el cincel del tiempo, talla sus valles, barrancos, crestas y depósitos. También el agua es determinante en la evolución del paisaje humanizado, el hombre necesita tener acceso diario al agua para cubrir sus necesidades, en caso contrario, no es posible la vida en comunidad. El agua es, por tanto, un elemento clave en la explicación del paisaje humanizado de cada una de las islas.

2. El agua en las sociedades prehispánicas

El análisis del papel que jugaron los recursos hídricos en la organización territorial en los pueblos aborígenes tropieza con un primer problema, el desconocimiento de la evolución histórica de estas sociedades. Las dataciones más antiguas sitúan el poblamiento de las islas a comienzos de primer milenio antes de nuestra era. Sin embargo, la visión de la época prehispánica ha estado condicionada por la sociedad aborígen que vieron los europeos, el final de una presencia con más de diez siglos de antigüedad. Es una historia sin tiempo, plana. Pero es evidente tuvieron que registrarse cambios y diferencias en el uso de los recursos y en su capacidad de transformar el medio durante tantas generaciones.

La distribución de la población está ligada, por encima de otros recursos, a la disponibilidad de agua, a la capacidad de captación y de almacenamiento que dependen, a su vez, del equipamiento tecnológico de estas sociedades. Hasta hace pocos años era un lugar común que las sociedades asentadas en las islas se basaba mayoritariamente en la ganadería y en una agricultura escasa y limitada a unas pocas especies cultivables. Gran Canaria acogía a los aborígenes más evolucionados, con sistemas de regadío y una cultura calificada de proto-urbana. Tampoco se incluía en los análisis de las sociedades prehispánicas los condicionantes ambientales y sus cambios, tanto los de origen natural como los antrópicos.

La disponibilidad de recursos hídricos ha ido cambiando desde que arribaron los primeros pobladores, el clima de las islas en los últimos 50.000 años muestra una progresiva aridificación. Durante el primer milenio a.n.e las islas eran más húmedas y, en consecuencia, la cubierta vegetal era mayor que en la actualidad. Los datos conocidos permiten saber que las dos islas orientales registraban unas precipitaciones suficientes para contar con bosques de pinos y especies del Monteverde como para abastecer las necesidades de madera y combustible de los primeros pueblos colonizadores. El análisis de los restos carbonizados encontrados en la cueva de Villaverde en Fuerteventura avalan la existencia de especies arbóreas todavía en el

siglo VIII (Yanes Y,2011).Las fuentes escritas también parecen validar la existencia de árboles de notables dimensiones en las islas orientales, Plinio, en su Historia Natural, al describir las islas de la Mauritania se refiere así a Lanzarote y Fuerteventura: *Las Afortunadas están a 250.000 pasos frente a la parte izquierda de la Mauritania hacia la octava hora de sol; se llame Invalide por su concavidad y Planasia por su relieve, Invalide tiene un perímetro de 300.000 pasos; allí los árboles llegan hasta los 140 pies* (Santana A, et al.,2002). Los depósitos sedimentarios formados durante el Holoceno revelan la existencias de horizontes de origen lacustre contemporáneos de estos primeros pobladores por lo que se puede concluir que el clima era sustancialmente más húmedo que el actual aunque en un precario equilibrio tendente a la aridez.

Así pues, los datos disponibles permiten afirmar que los primeros colonizadores llegaron a unas islas caracterizadas por la presencia de abundantes masas boscosas. Incluso Fuerteventura albergaba especies arbóreas propias de ambientes húmedos como el *Salix canariensis* (sauce), *Arbutus canariensis* (madroño) o el *Persea indica* (viñatigo). Esta cubierta boscosa facilitaba la infiltración, captaba la humedad de los alisios y mantenía a los acuíferos insulares a su máximo de nivel de equilibrio. La suma de estas circunstancias dotaba a las islas, no solo de abundantes fuentes que mantenían importantes caudales permanentes en casi todas las islas, también existían zonas lacustres y algunas perduraron hasta épocas recientes como la que dio nombre a la ciudad de La Laguna en Tenerife.

Como es evidente las necesidades hídricas de un colectivo están directamente relacionadas con el tipo de economía en la que basa su sustento. No es lo mismo un pueblo de pastores que depende de la disponibilidad de pastos, que los que dependen del suministro de agua para mantener su agricultura de regadío o de las lluvias para la de secano. Pero ¿Cómo eran las primeras sociedades establecidas en las islas? ¿Cómo llegaron? Son preguntas previas necesarias para comprender el papel que jugó el agua en las sociedades prehistóricas.

El primer problema que se plantea es que los arqueólogos mantienen posiciones completamente dispares, mientras un sector sigue defendiendo una arribada de pueblos de cultura neolítica y que fueron desterrados por los romanos por su insumisión al imperio. Otra escuela arqueológica explica el establecimiento de estos pueblos a la expansión de la navegación que se registra en el Mediterráneo a finales del segundo milenio antes de nuestra era. Las dataciones disponibles atestiguan la presencia de colonizadores en la primera mitad del primer milenio, además se han encontrado restos fenicios en la isla de La Graciosa fechados sobre al año 1000 a. n.

e. lo que parece indicar que las islas estaban incluidas en sus rutas, aunque también cabe la posibilidad de que fueran el resultado de una arribada forzosa.

En el caso de la hipótesis del poblamiento de las islas por pueblos con una economía basada en la ganadería, una agricultura rudimentaria y en la recolección de productos procedentes de los ecosistemas insulares, la dependencia de los avatares del clima es muy estrecha. Gaspar Fructuoso, describiendo Tenerife dice al respecto: “Cuando les faltaba lluvia para sus cosechas y pastos por una gran sequía hacía procesiones para rogar a su dios, llevando los ganados a lugares amplios como plazas que tenían ya delimitados para este fin y que llamaban y aún hoy llaman “bailaderos” y azuzando al ganado alrededor de los mismos, como si estuvieran trillando en una era, le hacían dar tantas vueltas a dicho ganado que éste ya desvanecido se echaba por el suelo; y una vez hecho esto se iban con la esperanza de recibir la lluvia deseada (Gaspar F, 2004). El aprovisionamiento del consumo de agua doméstica no era con la excepción de las dos orientales, un problema en las islas. La abundancia de nacientes y un clima más húmedo, permitía que la mayoría de los barrancos llevaran agua todo el año y, dado el tamaño de las islas, la distancia entre los núcleos de poblamiento y los lugares de recogida del agua tenían que ser pequeñas.

Para los primeros conquistadores, que procedían de una región de abundantes precipitaciones como la Normandía, reflejaron en sus crónicas la abundancia de aguas y la gran cubierta vegetal que tenían las islas (Le Canarien, 2003). Cuando describen la isla del Hierro destacan sus frondosos bosques. No menciona nacientes, aunque dice que “las aguas son buenas”, pero sí la captación de la precipitación horizontal: “El país es alto y bastante llano, cubierto de grandes arboledas de pinos y laureles que producen bayas de un grosor y un tamaño prodigioso; las tierras son buenas para los cereales, las vides y todo tipo de cultivos; en ellas se encuentran otros muchos árboles que dan diversos frutos. [...] Y en las tierras altas hay unos árboles que gotean continuamente agua buena y clara, que cae a unas fosas junto a ellos.” Menos en Lanzarote y El Hierro, los normandos hablan de corrientes permanentes en las islas y con caudales notables. Así, cuando describen La Palma señalan que “por el centro corre un gran río” y en Tenerife, la isla del infierno, “... hay una gran montaña, la más alta de todas las islas Canarias, cuya pendiente se extiende en todas las direcciones por la mayor parte de la isla, y todo alrededor hay profundos barrancos llenos de espesas arboledas y de hermosos manantiales.” La isla más rica, la que ofrecía unas mejores condiciones naturales y era la que contaba con más barrancos con aguas permanentes, era Gran Canaria. Lo refleja la crónica *Le Canarien* al resaltar la elevada densidad de población de la isla y sus abundantes recursos: “Es la más célebre de todas estas islas; por la parte sur las montañas son de una altura portentosa, y por el norte la tierra es llana y apta para el cultivo. Está cubierta de grandes

arboledas de pinos y abetos, de dragos, de olivos, higueras y palmeras datileras, y de muchos otros árboles que dan de diversas clases. La gente que vive en ella es muy numerosa, y dicen que son seis mil hidalgos, sin contar los de otra condición.” Las corrientes permanentes era frecuentes, incluso en la zona de sotavento: “A media legua del mar, por el lado nordeste, hay dos ciudades que distan dos leguas entre sí, una llamada Telde y la otra Agüimes, situadas junto a las corriente de unos arroyos; por el sudeste, se otra ciudad junto a la orilla del mar, en muy buena posición para fortificar: el lado que baña el mar es adecuado para fortificar y el otro lado tiene un arroyo de agua dulce, se llama Arguineguín.”

El panorama hídrico que describe la crónica francesa para las islas con menores precipitaciones y periodos de sequía más largos e intensos, no era desolador. Para Fuerteventura señala que “cuatro o cinco sitios se encuentra arroyos con suficiente corriente de agua dulce como para que puedan moler molinos. “Incluso propone la realización de lo que sería posteriormente un rasgo de su paisaje: “Por todo el terreno llano se podrían hacer pozos y disponer de agua dulce para regar los huertos, y hacer lo que se quisiera, pues hay muy buenas vetas de tierra para cultivos.” Y de Lanzarote comenta: “Hay un gran número de fuentes y aljibes, de pastos y buenas tierras para el cultivo, crece gran cantidad de cebada con la que se hace muy buen pan, y hay abundancia de sal.”

La tendencia decreciente de las precipitaciones ha sido una constante en los últimos milenios, El Sahara progresivamente se va convirtiendo en un desierto, en una barrera entre el mundo tropical y el de las latitudes medias. Canarias no escapa a esta tendencia, pero cuando los primeros colonizadores arribaron encontraron mucho más recursos hídricos que los observados por los primeros europeos.

Si se tiene en cuenta la hipótesis de un poblamiento ligado a pueblos comerciantes, la disponibilidad de agua tuvo que ser un factor clave en la organización en los nuevos territorios. No se trataría de colonizar nuevos territorios, el objetivo era explotar los recursos y exportarlos. Los productos isleños que podían interesar a estos pueblos eran los tintóreos, piscícolas, subproductos de la ganadería y, en menor medida la recolección, como fue el ámbar de cachalote, la caza o la explotación maderera. Para ello es necesario contar con un aprovisionamiento hídrico estable, especialmente la elaboración de salazones, preparación de odres y cecinas, lo que implica, en unas islas con una larga estación seca, la construcción de obras hidráulicas, depósitos, conducciones y de captación en los lugares donde no había manantiales que asegurasen la disponibilidad en los meses secos.

¿Qué datos arqueológicos avalan esta segunda hipótesis? La existencia de dataciones que atestiguan la presencia humana muchos siglos antes que los romanos crearan su imperio al comienzo de nuestra era. La hipótesis de la arribada forzada no explica porque estaban pobladas siete islas por pueblos que no conocían la navegación y, por tanto, vivieran secularmente aislados. A ello hay que añadir como lograron sobrevivir en islas como El Hierro sin que fueran diezmados por las epidemias, hambrunas o las consecuencias de la forzada endogamia. La reinterpretación de algunos restos arqueológicos, como los pozos del Rubicón en Lanzarote -atribuidos hasta ese momento a los conquistadores normandos a principios del siglo XV- como púnicos y romanos, avalan esta hipótesis.

Estos pozos serían por tanto las construcciones hidráulicas más antiguas conocidas en el archipiélago y pone en evidencia la importancia de agua en el asentamiento de los humanos. Estos pozos conllevan una enorme inversión, algo necesario para asegurar el suministro de agua para una actividad casi industrial como era elaboración de conservas de pescados, entre ellas el garum. Una factoría similar a las que se encuentran en las costas del noroeste africano destinadas abastecer el consumo de salazones y otros productos de la pesca a toda el área mediterránea. La lejanía de fuentes de aguas permanentes les obligo a realizar estos pozos para procesar los atunes que pasaban en sus migraciones pelágicas entre Lanzarote y Fuerteventura.

Recientes excavaciones en la Isla de Lobos han encontrado restos de época romana y en Lanzarote los estudios en la zona de El Bebedero han aportando una estratigrafía que va desde el siglo I de nuestra era al IV. Abarca, por tanto, desde el inicio del imperio hasta la crisis que pondría el punto final al largo dominio de Roma, tanto en el Mediterráneo como en el Atlántico noroccidental. Según Pablo Atoche las causas de la presencia de gente romana o romanizadas en aguas canarias se fue la consecuencia de “La riqueza pesquera de la costa occidental africana en la que destaca el banco canario-sahariano y de la existencia en las islas de elementos de interés comercial, tales como el “murex” (Atoche et al, 1995). En función de los datos obtenidos en estas excavaciones, los romanos explotaron los recursos de la isla a partir del siglo I y, básicamente, se dedicaron a la explotación de los recursos pesqueros y derivados de la ganadería caprina.

En las capas correspondiente a los dos primeros siglos se hallaron restos cerámicos, vidrios y metales, también eran abundantes los restos de ovicapridos que indicaban matanzas masivas en determinadas épocas del año. Coincidiendo con la crisis del siglo III, abundan en estos horizontes material lítico, de fractura bastante grosera, restos cerámicos de piezas hechas sin el concurso de los tornos y los restos de ganados indican que ya no se practicaba estas matanzas masivas. De ello deducen que la

“neotilización” es la consecuencia de la ruptura de las comunicaciones y la retirada del lime romano al norte de la latitud de Canarias.

La aceptación de esta teoría implica que la relación hombre-agua adquiere otra perspectiva. No solo hay que disponer agua para la supervivencia de los grupos humanos y de sus animales domésticos, además tienen que asegurar el suministro a actividades, como las salazones, que requieren disponibilidad de agua para poder desarrollarse.

Esta nueva manera de entender y explicar la historia pre-hispana de Canarias aportó una nueva mirada que está resultando muy positiva y que ha permitido una nueva mirada a los restos arqueológicos conocidos y encontrar nuevos yacimientos con los que tratan de avalar esta hipótesis. Los conocimientos técnicos de estos pueblos les permitió emprender obras hidráulicas: pozos, y las correspondientes canalizaciones, en las zonas costeras claves para la pesca que no contaban con un suministro asegurado. Según estos autores en Lanzarote canalizaban las escorrentías hacia amplias maretas que abastecían el consumo de la ganadería y permitían su transformación en productos exportables.

A partir del siglo III las poblaciones residentes en las islas perdieron sus conexiones con el exterior, y entre ellas, lo que les obligó a una evolución independiente y sometida a los recursos disponibles en cada isla hasta la conquista. Durante un milenio tuvieron sobrevivir en un medio pequeño y poco propicio por la escasez de recursos útiles. Las diferencias entre las islas a este respecto son notables, las dos orientales tienen en común la aridez y unos recursos hídricos escasos. Su especialización, obligada por las circunstancias, fue la ganadería mientras que la agricultura jugó un papel mucho más secundario.

Los estudios sedimentológicos en Lanzarote indican que la erosión comenzó a intensificarse a partir de los inicios de la colonización. Resulta lógico, la madera es una materia prima esencial, por lo que las masas arbóreas sufrieron una progresiva reducción y la consecuencia de la merma de la cubierta vegetal fue la reducción de los recursos hídricos.

En La Palma y La Gomera el agua no era un recurso escaso, pero si lo son las tierras aptas para el desarrollo de la agricultura. En la primera, la juventud geológica de la parte sur la hace poco para sostener una densidad de cabeza de ganado y sus suelos son poco aptos para una agricultura de secano. El norte de la isla, por contrario, es el dominio de la pendiente, de profundos barrancos separados por agudos interfluvios cubiertos de una densa masa boscosa que no facilita la vida de una sociedad de

base agropecuaria. En La Gomera tampoco la disponibilidad de agua era un problema, la abundancia de manantiales y los numerosos barrancos que mantenían la esorrentía incluso en los meses de verano, aseguraba un recurso vital a poca distancia de cualquier lugar de habitado, incluso en la árida zona de sotavento. Mientras que el norte de la isla cuenta con cuencas fluviales bien desarrolladas, las escasas zonas llanas se encuentran en las desembocaduras. Una densa cubierta boscosa cubre la meseta central y, prácticamente, llegaría a todo el litoral orientado a los alisios. Los interfluvios del área sur se caracterizan por su amplitud y suave topografía. De ahí el nombre local de “lomadas”. Aquí se encuentran las zonas más favorables para la ganadería y ello explica que sea la zona donde los arqueólogos localizan la mayor densidad de población.

El caso del Hierro es muy singular, no es una isla árida, su importante masa boscosa así lo indica, pero no cuenta con fuentes y manantiales con caudales suficientes para asegurar el suministro a personas y ganados. La aparente paradoja se explica por su corta historia geológica, es tan reciente que sus materiales son muy permeables y el agua no encuentra obstáculos en su descenso hacia el mar. Solo algunas pequeñas capas de almagra permiten la formación de pequeños acuíferos colgados que alimentan el escaso caudal de las fuentes de la Isla. Los dieciséis nacientes apenas se mantienen unos meses después de las lluvias. La dependencia de los avatares meteorológicos era muy alta, entre ellos destaca la captación de la humedad de los alisios, representado en la historia del Garoé. Viera y Clavijo cuenta así la historia del Garoé: “Algunos escritores de geografía y otros admiradores del famoso árbol del Hierro nos refieren (tratando la conquista de la isla) cierta circunstancia que, si no es una pura ficción, prueba que los herreños no se habían rendido de buena fe, o a lo menos que esperaban verse libres de la opresión de los extranjeros a beneficio de la sequedad del terreno y de su astucia. Porque no habiendo estos descubierto ningún manantial de agua vivaz en toda la tierra y horrorizados de tan molesta privación, preguntaban repetidas veces a los isleños qué agua solían beber. A lo que respondían que jamás habían usado ni tenían idea de otra especie de agua dulce que la del cielo. Entre tanto habían cubierto su amado árbol Garoé de una espesura de cañas y ramos, a fin de que, no reconociéndolo los europeos abandonasen la isla a la miseria de los que la habitaban” (Viera y Clavijo, 1976).

En la isla de Tenerife, a pesar de ser la de mayor superficie, ofrecía a la sociedad aborigen unas condiciones naturales poco propicias. La zona de la isla con mejores condiciones topográficas para las actividades agropecuarias es la más extensa, pero es la que se encuentra en la vertiente árida, caracterizada por la escasez e irregularidad de las precipitaciones. La franja húmeda, las laderas septentrionales tienen una mayor pendiente y cubierta de bosques. Esta diferencia tiene su reflejo en las eco-

nomías de los grupos guanches. “Por los estudios de paleo dieta efectuados sobre restos óseos guanches en el *Proyecto Cromos* del *Museo Arqueológico de Tenerife* podemos decir que la dieta vegetal fue bastante más alta en algunas zonas de la vertiente norte de la isla de Tenerife, frente a las del Sur donde prevalece la de composición animal. En efecto, en aquella, la práctica agrícola de veía favorecida por la existencia de suelos más fértiles y la disponibilidad natural de agua y, además, los recursos propios del Monteverde suponen un soporte altamente diferencial a la composición dietética de los grupos norteños que tenían así una estrategia alimenticia más variada que los habitantes sureños. Y, desde luego tales condiciones fueron prontamente explotadas, pues al menos en el S. III a. C. en Las Palomas está bien implantada la explotación agrícola (Arco Aguilar et al, 1996).

Los aborígenes de Gran Canaria fueron los únicos en contar con un sistema de regadío bien desarrollado: “En las tierras que plantaban de riego recogían el agua en albercas i la repartían con buen orden.” (Núñez Pestano, 2011). Esta isla contaba, no solo con más nacientes que Tenerife, también destaca por sus fértiles vegas, muchas de ellas antiguas zonas lacustres creadas por erupciones que obturaban la salida de algunos barrancos.

Las culturas pre-hispánicas sufrieron la irregularidad de las precipitaciones en Canarias, por largos periodos de sequías que afectaban gravemente a su sustento, pero no padecieron falta de agua en general. Pero los aborígenes modificaron de manera significativa la naturaleza insular, en primer lugar tuvieron que adecuar amplias zonas de la isla para pastos y terrazgos, además de favorecer a las especies que les resultaba más útiles. Estos cambios en la cubierta vegetal, además del continuado impacto de los ganados de herbívoros, repercutió en la infiltración, en el caudal de los manantiales y produjo una fuerte intensificación de los procesos erosivos. El estudio de estos sedimentos puede aportar muchos datos para comprender y conocer esta larga etapa de la historia canaria y ayudar a resolver algunos de los grandes enigmas, entre otros, el de su poblamiento.

3. El agua en la nueva sociedad Castellana

La incorporación de las Islas a la corona de Castilla culminó al finalizar la conquista de Tenerife en 1496, casi había transcurrido un siglo desde que los franceses conquistaron Lanzarote en 1402. Mientras que al principio fue una empresa señorial bajo égida de los reyes castellanos, la imposibilidad de terminarla por los sucesivos señores y la rivalidad con Portugal decidieron a los reyes castellanos a asumir directamente la conquista de las tres islas más ricas y pobladas: Gran Canaria, Tenerife y La Palma que

quedarían bajo administración realenga, al contrario de las otras cuatro sometidas, hasta la desaparición de los señoríos con la constitución de 1812, al régimen feudal.

El siglo de la conquista fue el siglo del saqueo de los pocos recursos acumulados por las sociedades indígenas: ganados, alimentos, esclavos, y algunos pocas cosas de alto valor para los europeos como el ámbar y otros productos de recolección. Pero, con la conquista de las tres islas restantes pronto se pusieron las bases de la explotación de los nuevos territorios. Europa demandaba azúcar, las exigencias de este cultivo limitaba a pocas zonas del entorno mediterráneo los lugares aptos. La colonización de la isla de Madeira y sus condiciones climáticas e hidráulicas hizo prosperar el cultivo de la caña. Finalizada la conquista de Gran Canaria los nuevos señores de la isla se encontraron con una isla con buenos suelos y abundante agua. Amplias vegas y extensas llanuras litorales ofrecían excelentes condiciones para los cañaverales y los recursos hídricos y la madera de los bosques facilitaban su transformación en azúcar en los ingenios. Además heredaron las infraestructuras hidráulicas (Azudes, canales y albercones) construidas por los aborígenes lo que les facilitó la creación de las primera plantaciones a partir de 1480. El nuevo cultivo también se implantó simultáneamente en La Gomera en 1480 y, después de 1496, se extendió por Tenerife y La Palma.

El cultivo de la caña ocupó las zonas bajas de las islas que tenían suficientes recursos hídricos para asegurar el riego y el funcionamiento de los ingenios. Durante siglo y medio el cultivo de la caña aseguró un prolongado crecimiento económico he hizo posible el poblamiento de las islas a pesar del atractivo del continente recién descubierto. El riego de los cañaverales implicó la disociación de la tierra y el agua, había que trasladar de parcelas el cultivo una vez que se agotaban los suelos y adecuar la red de canales y acequias a la nueva ubicación.

Los cañaverales supusieron una radical transformación paisajística. Los nacientes quedaron bajo el control de la élite dirigente formada por los conquistadores castellanos y los financieros de la conquista, especialmente genoveses y flamencos. Los Heredamientos de Aguas fue la forma que permitió a los dueños de tierras e ingenios privatizar progresivamente los recursos hídricos. No fue éste el único cambio, las enormes necesidades de leña de los trapiches implicó la rápida desaparición de la mayor parte de los bosques, especialmente en las dos islas con mayor número de ingenios, Gran Canaria y Tenerife. A esto hay que sumar la utilización de los pinares para la construcción y para fabricar brea. De hecho, la explotación de los recursos forestales comenzó, incluso antes de la conquista en Tenerife. Una vez asentado los colonizadores, hubo que eliminar la vegetación de las zonas destinadas a los culti-

vos, no solo para la caña, también hubo que desbrozar para ganar terrazgos para la agricultura de subsistencia de los primeros pobladores.

El resultado de la colonización fue un cambio drástico, las aguas de los nacientes dejaron de correr libremente por los barrancos, la menor cubierta vegetal facilitó la erosión, disminuyó sensiblemente la precipitación horizontal y la infiltración. En 1563 el Cabildo aprobó una ordenanza prohibiendo, bajo pena de 10.000 maravedíes, la saca de madera y leña con el argumento que “de algunos años a esta parte en esta Ysla se an talado e disminuido las montañas della que es muy gran daño y perjuicio e una de las principales causa a sido sacar de esta Ysla para fuera de della madera e leña”, (Núñez Pestano, 2011).

Aunque la finalización del ciclo del azúcar redujo la demanda de leña, la explotación maderera continuó durante los siglos siguientes. Las carboneras, la brea, la construcción o el suministro de los astilleros seguían demandando grandes cantidades de maderas. En cambio la desaparición de los cañaverales redujo sustancialmente la demanda de agua con lo que se destinó, dado que la vid es menos exigente a los cultivos destinados al consumo interno.

No sería hasta finales del siglo XIX cuando nuevos cultivos de regadío, plátanos y tomates fundamentalmente, dan lugar a un nuevo paisaje agrario en las zonas bajas. La demanda de agua se dispara y hace insuficiente los caudales de los nacientes. La revolución industrial puso los medios técnicos para que se iniciara el alumbramiento del agua subterránea mediante galerías y pozos. En las dos islas principales las consecuencias fue la progresiva disminución de los caudales de las fuentes y la alteración de los acuíferos.

Bibliografía consultada y referencias

- YANES, Y. (2011): El paleoclima de Canarias. Makaronesia. Págs. 74-87
- HERNÁNDEZ, F Y SÁNCHEZ, D. (1990): Informe sobre las excavaciones arqueológicas en la cueva de Vilaflor (Fuerteventura) Investigaciones geológicas nº 2.
- SANTANA A. ARCOS, T ATOCHE, P. Y MARTÍN, J. (2002): El conocimiento geográfico de la costa noroccidental de África en Plinio: la posición de las Canarias. Spudasmata Hildesheim.
- GASPAR F. (2004): Descripción de las Islas Canarias, pág. 70. Traducción Pedro Nolasco.
- LE CANARIEN. (2003): Edición Instituto de Estudios Canarios. 2003
- ATOCHÉ ET AL. (1995): Evidencias arqueológicas del mundo romano en Lanzarote. Cabildo de Lanzarote, pág. 109
- VIERA Y CLAVIJO. (1976): Historia de Canarias. Goya Ediciones. Tomo I, pág. 340
- ARCO AGUILAR M^a DEL C. et al. (1999): Los Guanches desde la Arqueología. Organismo Autónomo de Museos, pág 24.
- JIMENEZ, J.J. (1990): Los Canarios Etnohistoria y Arqueología. Cabildo de Tenerife, pág. 59
- NÚÑEZ PESTANO, J. R. (2011): Historia de los montes de Tenerife. Universidad de La Laguna, pág. 80.

Introducción a la cultura, historia y evolución del conocimiento del agua en Canarias

Francisco Suárez Moreno
Juan Carlos Santamarta Cereza

1. Introducción

Las Islas Canarias, en el conjunto de la biodiversidad que las define y con sus especificidades climáticas, orográficas, biológicas y económicas, ofrecen las más variadas estrategias hidráulicas, en el marco de una arraigada cultura del agua.

La sociedad aborígen ya desarrollaba sencillas obras y luego, tras la colonización europea, se fue generando una nueva, compleja e interesante infraestructura hidráulica, hasta que alcanza una mayor profusión con el cambio económico que se produce, entre finales del siglo XIX y mediados del XX, con el desarrollo comercial y portuario del librecambio, sobre todo con los cultivos de tomates y plátanos. A lo que se une más tarde el nuevo campo de las ingenierías de la desalación.

Por tanto, la hidrología, el aprovechamiento y captación del agua con sus más variados ingenios y arquitecturas en el archipiélago canario es única, singular y eficiente; todo ello fruto de un estudio profundo de la hidrogeología y de los factores ambientales de las Islas, así como por la importación y a su vez desarrollo tecnológico de maquinarias e ingenios hidráulicos, en especial a lo largo de los últimos 130 años. Para satisfacer las demandas hídricas se han recurrido a las captaciones subterráneas, al aprovechamiento superficial y por último a la producción industrial del agua.

Canarias tiene similitudes de lo que ocurre en otros sistemas insulares volcánicos, como por ejemplo; Madeira, Azores, o incluso el archipiélago de Hawái. El funcionamiento de sus niveles hidrogeológicos es similar en estas islas volcánicas que en Canarias, aunque el aprovechamiento del recurso hídrico, por las condiciones climáticas mucho más húmedas de dichos archipiélagos, no genera un desarrollo parecido aunque se pueden presentar algunas estrategias comunes. Es el caso, por ejemplo, de los primeros maestros del agua, que tras la Colonización europea fueron traídos de Madeira para construir acequias y obras de almacenamiento. No obstante en la tecnología minera para captar aguas subterráneas hay que buscar la relación original en la tecnología hidráulica árabe vía la Península Ibérica.

Las obras y el conocimiento profundo hidrológico insular, por su excelencia, antigüedad e importancia en la economía y desarrollo insular, han tomado carácter de patrimonio etnográfico en la mayoría de las obras hidráulicas antiguas, la mayoría en activo, por ello paralelamente se ha generado un conocimiento y tecnologías asociadas a los medios volcánicos e insulares, con posibilidades de transferencia a otras regiones de similares características. Este patrimonio también puede ser utilizado como un recurso turístico como posterior función una vez catalogado y reconocido.

Los recursos hídricos canarios y la forma de obtenerlos conllevan técnicas, muchas veces únicas, usadas desde hace siglos, perfeccionadas hasta nuestros días y exportables a otros sistemas insulares volcánicos mediante el proceso denominado transferencia tecnológica.

Estas infraestructuras, son las que mejor se han adaptado a la realidad insular y a sus singularidades hidrológicas. Es interesante conocer su evolución histórica y las consecuencias de su abandono; sobre el efecto de su dinámica en los procesos de erosión y las propiedades edáficas.

Por un lado están las obras de aprovechamiento hídrico superficial, en este sentido se encuentran muchas estrategias de captación como madres, azudes, tomaderos y sus consecuentes arquitecturas de almacenamiento unas domésticas para el grupo de las islas orientales como *alcogidas* y *aljibes* y otras de más envergadura como *estanques*, *albercones*, *maretas* y *presas*. E incluso en otras formas de aprovechamiento de las escorrentías referidos a diversos tipo de agro-sistemas e hidrocultivos tales como *enarenados*, *gavias*, *nateros*, *berreras*, *bancales*, etc. obras magníficas, porque son recolectoras de agua, la cual que se perdería por las laderas de no existir estas arquitecturas que además sujetan suelo, reducen la erosión y por supuesto crean un paisaje singular y admirable por el turismo.



Figura 2.1; Salinas y Canales en Lanzarote (Santamarta JC, 2010).

Los recursos hídricos subterráneos también han sido aprovechados por unas obras singulares y de elevada eficiencia y durabilidad (algunas con siglos de antigüedad e incluso milenios si incluimos los pozos púnicos de Lanzarote). Destacamos los *pozos* (en casi todas las islas), las *minas de agua* (en Gran Canaria) y las *galerías* (en La Palma, Tenerife y Gran Canaria), lo que podemos denominar como la estrategia minera del agua dulce, que por su densidad y variedad podemos considerarla única en el mundo. Por tanto la ingeniería minera, en Canarias, ha aportado y en algunas islas todavía aporta, la mayoría de los recursos hídricos que se consumen en el archipiélago, y está representada en todas las islas.

En este amplio campo de la cultura del agua en Canarias destaca además el aprovechamiento de los recursos con sus correspondientes ingenios y arquitecturas de sus aguas termales-medicinales a lo largo del tiempo (fuentes santas y balnearios) como mejor ejemplo de las características geológicas de estas islas volcánicas. También lo es el aprovechamiento energético a lo largo del tiempo del agua a través de ingenios hidráulicos tanto para mover molinos de caña de azúcar, en los primeros años de la Colonización y como lo harineros a lo largo de cinco siglos y que actualmente

conforma uno de los capítulos más interesantes del Patrimonio Cultural canario. Asimismo la gestión, medida y distribución del agua reúne unas extraordinarias estrategias y arquitecturas, patrimonio cultural tanto tangible como intangible en lo que conforman las comunidades de regantes, las medidas tradicionales de fluidez agua tan distintas en cada isla como los distintos modelos de pesadores de la misma (cantoneras y aforímetros).

La cultura del agua en Canarias no sólo ha dejado una profunda huella en su historia, su geografía y tecnología, sino también en el habla, la toponimia, la medicina popular e incluso en la visión cósmica y las creencias religiosas desde la época de las sociedades indígenas canarias, lo que ha venido conformando un valioso patrimonio cultural intangible necesitado de protección.

Pero hay un factor determinante para el estudio del Patrimonio Hidráulico en Canarias que es la fragmentación del territorio y su biodiversidad.

2. Antecedentes históricos y consolidación de una singular cultura del agua

Los primeros asentamientos humanos en Canarias, probablemente púnicos establecidos, en Rubicón, Lanzarote, unos siglos a. de C., en actividades pesqueras que luego abandonaron, perforaron los primeros pozos-aljibe que aún subsisten. Pero esto sucedió muchos años antes de establecerse la sociedad indígena canaria originaria, tras diversas oleadas, del noroeste de África (Atoche, et. al,1999).

2.1. Estrategias y arquitecturas de la sociedad indígena

Los antiguos pobladores de las islas tenían relativamente satisfecha la disponibilidad del recurso hídrico, salvo en la isla de El Hierro, simplemente con acercarse a los numerosos barrancos, por los cuales discurrían pequeños cursos de agua, que brotaban procedentes de los manantiales. En la isla de El Hierro se dispuso del *árbol Garoé* y de los *guácimos*.

La sociedad indígena que conocieron y conquistaron los europeos a lo largo del siglo XV, ya se las ingeniaba a través de fuentes, piletas en riscos, eres o pocetas y muros de piedra en las barranqueras, acequias y albercas e incluso cuevas filtrantes

donde se captaba y distribuía el agua en función de sus necesidades, como estudiaremos más adelante, en cada uno de los sistemas hidráulicos tradicionales.

Las crónicas castellanas de la Conquista de Gran Canaria, en el siglo XV, dan referencias sobre sencillas obras hidráulicas ejecutadas por los aborígenes, confirmadas por las prospecciones arqueológicas, entre otras, las canalizaciones significativas y pilas excavadas en la roca en las Cuevas de Jerez, Telde; en Arteara, Tirajana y de unos canalones de piedra en el barranco de Telde y otras excavaciones en rocas por toda la Isla con claros indicios de ser obras hidráulicas para abastecimiento doméstico o para el pequeño desarrollo agrícola de estas poblaciones.

Luego, en ésta como en las restantes islas realengas una variada documentación escrita generada tanto en el siglo XV (referidas de la Conquista) como a lo largo del siglo XVI, en protocolos notariales, ordenanzas municipales y repartimientos de tierras y aguas, hace continuas referencias a muchas obras hidráulicas preexistentes de la sociedad aborígen como piletas, eres, acequias, albercones... al igual que en las islas del Señorío constan obras anteriores a la colonización europea destacando algunas de gran capacidad como las maretas de Lanzarote.

2.2. Nuevas estrategias e ingenios hidráulicos de la Colonización europea (siglos XV-XVI)

Conquistadas las Islas y desarticulada la sociedad aborígen, comenzó en cada una de ellas, por parte de los vencedores, la explotación de los recursos naturales, donde el binomio tierra-agua representó la base del desarrollo económico. En las islas realengas (Gran Canaria, Tenerife y La Palma), conquistadas directamente por los reyes y más ricas en recursos naturales, se comenzó a desarrollar una nueva, compleja e interesante, cultura del agua para el cultivo de la caña dulce y su industria azucarera. Su progresiva expansión económica y demográfica se basó fundamentalmente en el adecuado aprovechamiento de sus recursos hidráulicos, gracias a la favorable coyuntura de las exportaciones, primero del azúcar y luego del vino conectado a la producción agropecuaria para el consumo interno, además del comercio ultramarino.

En los primeros repartimientos de estas islas el agua que nacía desde las cumbres quedó vinculada a las tierras bajas, de lo que surgió un régimen especial de propiedad denominado *heredamiento* y controlado por los nuevos dueños de los medios de producción. Los caudales, una vez abastecida las necesidades de la población,

se encauzaron hacia las plantaciones de caña dulce con sus ingenios, poblamientos cercanos y molinos de agua, así como hacia los sembrados de granos, hortalizas y frutales. En las islas de señorío, La Gomera, El Hierro, Lanzarote y Fuerteventura, con menos recursos y población, su escaso desarrollo económico no dio margen a la generalización de obras e ingenios hidráulicos, limitándose su desarrollo tecnológico hidráulico a la captación de las aguas superficiales a través de acequias y su regulación, en determinados casos, a pequeños estanques y aljibes.

Pero la nueva economía de las Islas realengas demandó desde el primer momento, entre finales del siglo XV y mediados del XVI, profesionales (albañiles, carpinteros y “maestros de sacar agua”) para ejecutar las primeras obras hidráulicas. En su mayor parte fueron traídos de Madeira. Se construyeron acequias, canales, tanques, albercas, pozos domésticos, minas y túneles para el trasvase del agua. También ejecutaron variados ingenios tanto para elevar el agua, las norias y tornillos, como para aprovechar su energía en los saltos, los molinos de agua y batanes.

2.3. Transferencia de la tecnología hidráulica canaria al Nuevo Mundo (siglos XVII-XVIII)

Los primeros elementos tecnológicos hidráulicos así como el régimen de propiedad y de administración del agua se adecuaron al entorno y constituyeron una generación informal de la tecnología que, una vez consolidada, se mantuvo casi inalterable hasta el último cuarto del siglo XIX. No obstante, a medida que pasaban los años se perfeccionaron los sistemas y técnicas de medición de aguas. Las ordenanzas que regulaban los primeros *heredamientos* de agua se adaptaron a la privatización ya que, con el tiempo, las aguas se desvincularon de la tierra y su propiedad se transmitió separadamente a la de ésta, generando numerosos conflictos.

La distribución del agua en las islas realengas, controlada por rigurosos turnos, las *dulas*, generó con el tiempo un sistema de medidas de caudal preciso de tipo temporal (día, hora y minuto) aunque en unidades de diferente magnitud, según islas y comarcas. Una distribución llevada a cabo de manera similar a las aguas de las *levadas* (acequias) de Madeira, bajo la autoridad de una institución insular, los *alcaldes de agua* que se corresponden a los *juiz da água* de aquella isla portuguesa que tanto influyó en la colonización de Canarias. Del sistema de medida primitivo de caudales de aguas, basado en medidas específicas de fluidez según islas y zonas (*azada, cuarta, surco, pipa...*). Los primeros maestros del agua buscaron soluciones en curiosas arquitecturas del agua como son las *cantoneras* y *pesadores de agua*,

ejemplo de la generación informal de la tecnología, en este caso aplicaciones sencillas pero ingeniosas de los principios de Hidrodinámica), que se van a desarrollar con profusión cuando el agua se acaba por privatizar aún más entre finales del siglo XIX y principios del XX.

La transferencia de tecnología y materiales hidráulicos hacia el otro lado del Atlántico fue un hecho tan real como poco estudiado hoy y es que desde unos puertos canarios de escala obligada de los navíos hispanos y, con un constante flujo emigratorio, los isleños aportaron contingentes humanos y llegaron a fundar poblaciones importantes hoy, como por ejemplo San Antonio de Texas o Montevideo. Lógicamente su experiencia hidráulica fue llevada a tan lejanos lugares como es el caso de las estrategias hidráulicas (canalizaciones y gestión) implantadas por canarios en San Antonio de Texas y el trabajo en las acequias, canalizaciones y algunas galerías de agua en Venezuela, junto a la implantación de sistemas de irrigación y de gestión, tanto en haciendas privadas como en misiones a lo largo del siglo XVIII. Muchos son los ejemplos de maestros canarios que aportaron valiosas soluciones técnicas para el diseño de acueductos y la gestión del agua transportada por el sistema de dulas o la técnica minera para la construcción de galerías y minas de agua fuera llevada tanto desde los reinos hispanos peninsulares como de Canarias a tierras americanas). Otra aportación canaria en la hidráulica doméstica es la difusión de la pila de agua o destiladera o tinajero destilar el agua potable y mantenerla fresca, que encontramos en la vivienda tradicional de varios países como Venezuela, Cuba, Puerto Rico, Santo Domingo, Méjico, Chile, etc.

2.4. La evolución tecnológica propiciada por la agricultura de exportación (siglos XIX y XX)

El aumento de población y la entrada de la revolución industrial supuso para las islas un problema a nivel de demanda de agua, debido principalmente a los cultivos agrícolas que se llevaban a cabo en las islas en esos momentos, como la caña de azúcar, un gran demandante de agua, esto unido a que se está hablando de una época donde los sistemas tecnificados de riego, brillaban por su ausencia, suponía una demanda hídrica, imposible de satisfacer.

Tras el fracaso económico de la economía del vino de exportación y pérdida de los tradicionales privilegios fiscales y librecambio las islas entraron según avanzaban las primeras décadas del siglo XIX en una grave crisis. Tiempo de independencia de las colonias americanas la burguesía canaria arranca del Estado un nuevo régimen

fiscal, el Puerto Franco (1852), que se consolida según avanza los años con un nuevo libre comercio y desarrollo portuario y comercial. Ello permite primero nuevos cultivos como la cochinilla, más tarde la caña dulce para la industria azucarera y finalmente las papas, tomates y plátanos con destino al mercado europeo de la libra, que propició primero una gran demanda de agua, nuevas obras hidráulicas y la importación y a su vez desarrollo tecnológico propio de máquinas para elevar agua así como grandes estanques para regularla o presas para almacenar las aguas pluviales. Es otra historia de la hidráulica canaria que esta vez tiene por protagonistas a todas las Islas Canarias ya dentro de un mismo marco político y económico: el liberalismo y el capitalismo agrario.

Se produjo pues un gran avance de la superficie cultivada de las zonas bajas de la Isla, que demandó una gran cantidad de agua. Había que buscarla donde fuera, en el subsuelo o almacenarla de la lluvia. Su propiedad y gestión evolucionó en el contexto del sistema capitalista. Las antiguas heredades se transformaron en comunidades de regantes y el mercado del agua, según avanzaba el siglo XX, generó importantes capitales privados en manos de los denominados aguatenientes.

Los adelantos de la Revolución Industrial procedentes tanto de Europa como de Estados Unidos permitieron un gran desarrollo insular de la tecnología hidráulica. La isla se horadó con miles de galerías y pozos, donde se instalaron para la succión del agua sucesivamente norias modernas, aeromotores, máquinas de vapor y motores de combustión interna. Y, además, se construyeron todo tipo de estanques, maretas, presas y canales, una gran infraestructura hidráulica llevada a cabo con capital tanto privado como público.

Existía un desconocimiento del acuífero insular, simplemente por observación, se notaba que existían unos manantiales en las vertientes, por donde brotaba el agua, con unos caudales que para aquella época eran insuficientes, por lo que la iniciativa privada emprendió la tarea de excavar esos manantiales con la esperanza de alcanzar caudales mayores, con esta acción comenzaron las galerías de agua, que supusieron un avance económico sin igual en las islas eso si en manos privadas, lo que a la par ha supuesto la situación actual en la planificación hidrológica insular y los mercados del agua.

Pero en pocas décadas y los acuíferos comenzaron a sentir los efectos de su sobreexplotación y los acuíferos cuando se rebasa la mediana del siglo XX se agotaron; primero se secaron las minas de agua excavadas desde tiempo inmemorial en los cauces de los barrancos, luego los pozos y galerías que necesitaron profundizarse más.

Agotados los acuíferos, a finales del siglo XX, se dictan nuevas leyes, el agua pasa a ser bien público y se presentan alternativas nuevas de generación del agua como lo es la desalación. A la vez, esta larga evolución histórica ha ido generado en cada isla una arraiga y singular cultura del agua incluso en el plano inmaterial que conforma el amplio campo del Patrimonio Hidráulico de Canarias. Una historia del agua, singular, larga y difícil de sintetizar, escrita en gran parte y reflejada en una prolija bibliografía tanto de aspectos generales como específicos y locales que seleccionamos en el apartado final correspondiente.

2.5. Una diferente dialéctica hombre-Naturaleza para cada isla

Esta evolución histórica ha ido generando la arraigada y singular cultura canaria del agua. Todo ello producto de la relación entre la naturaleza, la historia y el ingenio de los habitantes de cada una de nuestras islas, la distribución espacial de las obras e ingenios hidráulicos en este archipiélago es muy compleja y heterogénea. Las islas occidentales (La Palma, La Gomera, El Hierro y Tenerife), más húmedas, han desarrollado más sistemas de captación de aguas manantes y superficiales, más la estrategia minera de búsqueda de acuíferos colgados a través de galerías. Gran Canaria, con un gradiente orográfico más complejo más una zona húmeda a barlovento y otra muy árida a sotavento, ha conformado una mayor variedad de arquitecturas hidráulicas de gran densidad, primero de minas de agua y luego de pozos enlazados a sus albercas y estanques reguladores más las presas y canales modernos. Y las islas más orientales, Fuerteventura y Lanzarote, muy áridas, han calmado la sed con otras estrategias más singulares como lo han sido la captación de las aguas pluviales en aljibes y alcogidas, o acondicionando los terrenos de cultivos en gavias, o perforando pozos en los que se idearon curiosos artilugios para la elevación de las aguas subterráneas.

3. Evolución del conocimiento científico sobre el agua en las islas

El conocimiento profundo del medio insular y los factores técnicos que condicionan la captación y gestión de los recursos hídricos, arrojan un resultado de una optimización de los recursos y eficiencia en la gestión de los mismos. Este conocimiento, como se ha comentado, se puede transferir a otras zonas de características similares como, por ejemplo, la región de la Macaronesia, Cabo Verde y otras islas de conformación volcánica; de hecho, entre los siglos XVI y XVIII, muchas estrategias

hidráulicas para la captación, conducción y gestión del agua fueron llevadas desde Canarias al Nuevo Mundo y allí se implantaron y adaptaron a cada medio natural.

A principios del siglo XX, existen en Canarias muchos ilustrados y científicos que comienzan a escribir sobre el agua, ya que el líquido elemento comienza a dar signos de agotamiento mediante el aprovechamiento de nacientes y las aguas superficiales y alguna que otra mina drenante en nacientes o en barrancos conjuntamente con los pozos canarios. A esto se suma un aumento de población importante y la entrada de la revolución industrial que supuso para las islas un problema a nivel de demanda de agua, debido principalmente a los cultivos agrícolas que se llevaban a cabo en las islas en esos momentos, estos y otros factores suponían una demanda hídrica, imposible de satisfacer. Podemos destacar en esta época, los estudios del Servicio Geológico de OOPP.

En esos primeros años de inicio de la hidrología insular y su vinculación en creciente importancia a las economías de las islas, comienzan a aparecer los primeros estudios sobre los recursos hídricos. En el año 1925 se incluyen dentro de los problemas de Canarias, los relacionados con los recursos hídricos, en las publicaciones de la Real Sociedad Geográfica de Madrid por Lucas Fernández Navarro.

De Ascanio y León, R. con el estudio *Gran Canaria y sus aguas subterráneas*, en el año 1926, conservado actualmente en la Real Sociedad Económica de Amigos del País de Tenerife, en La Laguna, particulariza los estudios hidrológicos para la isla de Gran Canaria. Aunque el primer estudio serio de la época sobre el aprovechamiento de aguas de las islas Canarias fue realizado en el Boletín del Instituto Geológico y Minero de España en el año 1930.

En los años cincuenta aparecen en escena los recursos hídricos atmosféricos con el ingeniero de montes Francisco Ortuño a la cabeza, Ortuño comienza a observar que los balances hidrológicos de las islas occidentales, en algunas zonas son negativos y esos desajustes de agua deben ser compensados de alguna manera, la solución la planteó en el año 1951, con un experimento recogido en una publicación posterior, donde mediante la colocación de sendos pluviómetros *Hellman*, uno bajo copa y otro en exterior, en una zona de Tenerife estimó esta lluvia horizontal como tres veces la convencional. En este documento se ha creído conveniente en limitar ese valor a valores del doble, como mucho o bien 1,5 veces más, aunque verdaderamente todo depende de la localización del punto de estudio y su *microclima* particular.

Federico Macau, inicia la evidencia más moderna sobre los problemas con los recursos hídricos canarios, con su informe sobre *El problema hidráulico canario*, en

el año 1960. Otros trabajos de esa época sobre Tenerife son los de calidad del agua de galerías del profesor Fernández Caldas, de la Universidad de La Laguna. Telésforo Bravo, científico canario, el cual centró su actividad investigadora en el vulcanismo y el agua, su profundo conocimiento del subsuelo de las islas le permitió sentar las bases para una nueva explicación de la formación de valles y calderas, acorde con los nuevos datos aportados por sus estudios de las galerías de Tenerife. Demostró que los valles de La Orotava y Güímar se habían formado a partir del deslizamiento catastrófico de las laderas de la Isla y que Las Cañadas era una depresión abierta hacia el mar a través del valle de Icod lo que descartaba que su formación se debiera a un hundimiento de la parte central de Tenerife. Y, en 1968 comienza a hablarse de los problemas del agua subterránea.

El conocimiento hidrológico de Canarias hasta los años setenta hasta la realización del proyecto *SPA-15* era muy escaso, salvo pequeñas aportaciones individuales y estudios relacionados con las explotaciones de aguas subterráneas que prácticamente no salían a la luz pública, o bien, sólo se podía consultar la documentación administrativa sin mucho contenido técnico. Existían por tanto numerosas perforaciones que podían funcionar como laboratorios hidrogeológicos, pero sin aplicar el conocimiento científico que posteriormente se ha utilizado profusamente, tanto en galerías como en sondeos y pozos, algunos de hasta 700m.

Como se ha comentado el gran impulso para estudiar científicamente la hidrología insular nace en los años setenta de manos de un gran proyecto auspiciado por la UNESCO, el *SPA-15*. El proyecto, "*Estudio Científico de los Recursos de Agua en el Archipiélago Canario*", publicado en 1975, representa el comienzo del conocimiento sistemático de la realidad hidrológica del archipiélago, de tal modo que muchos de sus estudios han servido para fijar determinadas conclusiones que han permanecido sin analizar con mayor profundidad en los estudios posteriores. Se trataba de recopilar todos los datos posibles de precipitaciones, infiltración, escorrentías y relacionarlos con los obtenidos en galerías y pozos, para conocer la circulación de las aguas subterráneas.

El *SPA-15* fue un estudio que vino a inventariar y a poner un orden relativo a las captaciones subterráneas y superficiales, si bien con respecto a estas últimas, según algunos autores, no fue muy acertado por un sobredimensionamiento de la escorrentía superficial, hay que reconocer que el esfuerzo relativo fue interesante de cara a posteriores estudios y como base de órdenes de magnitud de los recursos hídricos en el archipiélago. Destacamos al Doctor Ingeniero José Sanz de Oiza el cual fue Director Ejecutivo del citado proyecto Canarias *SPA-15*.

Otro proyecto de referencia fue el MAC-21, "*Proyecto de Planificación y Explotación de los Recursos de Agua de las Islas Canarias*", complementa los datos del SPA-15, actualizando en parte los recursos al año 1978 y dedicando un importante esfuerzo a la determinación y proyección de las demandas de agua.

En los años ochenta comenzaron a disminuir las inversiones privadas en las captaciones de agua, esto unido al desarrollo de la desalación, supuso un abandono progresivo de la ejecución de nuevas perforaciones, si bien, se seguían reperforando otras para lograr mantener o aumentar los caudales alumbrados.

En los noventa, la Administración comienza a ejecutar proyectos de galerías, los más singulares son el Pozo de los Padrones e Ipalan en El Hierro y la Gomera respectivamente. Otro punto a tener en cuenta son los avances de los planes hidrológicos, principalmente en las islas occidentales, ya que las orientales quedaron a merced de la desalación (no había otra solución tan rápida y viable), como fue el caso de Lanzarote y Fuerteventura y en menor medida la capital de Gran Canaria, Las Palmas.

Por otro lado, también en los años noventa y ya con fuerza en el nuevo siglo XXI comienzan a desarrollarse trabajos diversos en diferentes islas de recopilación y estudio de obras hidráulicas históricas como parte del Patrimonio Cultural Canario, lo que se refleja en catálogos municipales, cartas etnográficas insulares, guías de patrimonio etnográfico y diversas publicaciones tanto divulgativas como científicas. Por tanto este conocimiento hidrológico puede complementarse mediante una declaración de Patrimonio Hidráulico canario, la transferencia de conocimiento a otras regiones similares y, por último, aglutinar toda la documentación relacionada con la cultura del agua y hacerla accesible a la ciudadanía.

También desde los años noventa Emilio Custodio Gimena y Carmen Cabrera Santana de la ULPGC, han propiciado un conocimiento científico muy importante, extenso, y riguroso; sentando las bases de la hidrogeología de terrenos volcánicos y el funcionamiento de los acuíferos insulares, sobre todo los trabajos con técnicas hidrogeoquímicas, que se analizarán en siguientes capítulos.

En el ámbito social hay que destacar a Federico Aguilera Klink, con la introducción del concepto de la *nueva economía del agua* y los recursos naturales. Por otro lado son destacables los trabajos del *agua y la sociedad canaria* del geógrafo y gran defensor del medio natural canario Eustaquio Villalba.

En el estudio de la meteorología la referencia sobre el conocimiento particular de las precipitaciones y los parámetros agroclimáticos en Tenerife, es Luis Manuel San-

tana Pérez un técnico del desaparecido ICONA, que entre otras cosas, impulsó el conocimiento de la precipitación horizontal que años antes habían trabajado Ortuño y Baladrón; sin desmerecer a sus trabajos sobre la meteorología de Tenerife, accesibles en la web www.agrocabildo.com.

Más actuales son las centrales hidroeléctricas que se pueden considerar el presente, desarrolladas técnicamente por el Ingeniero de Caminos Juan Manuel Buil de la empresa ENDESA SA, cuyo trabajo ha sido excepcional en ese sentido y atisba un futuro energético basado en las renovables interesante, sobre todo la producida por sistemas hidroeléctricos.

En este amplio marco, que no podemos detallar todos sus aspectos, no podemos dejar atrás el esfuerzo de los legisladores canarios con el diseño de normas específicas encaminadas, en base a las disposiciones, a considerar el agua como un bien común, escaso y lo más alejado de la especulación comercial a que estuvo sometida a partir del liberalismo decimonónico, con entes de gestión y control públicos como son los Consejos Insulares de Agua de cada isla. Y, por último, tampoco debemos soslayar que el estudio del agua ha tenido en la segunda mitad del siglo XX y hasta la actualidad una interesantísima literatura científica en el ámbito de las disciplinas de Geografía, Historia, Etnología... a través de investigadores algunos de los cuales referenciados en la bibliografía; en museos locales específicos, así como en la Didáctica y sus contenidos aplicados en nuestras escuelas, institutos y universidades lo que ha permitido conocer mejor tanto la evolución a lo largo del tiempo en nuestra cultura y tecnología como en la huella impresa en lo material e inmaterial de nuestros bienes patrimoniales; aunque muchos de ellos aún no están lo suficientemente protegidos tanto en el adecuado marco legal de los inventarios de cartas etnográficas y catálogos municipales como en las distintas categorías de bienes de interés cultural (BIC) en lo que nuestro patrimonio hidráulico está poco representado.

Bibliografía consultada y referencias

- ATOCHÉ, PEÑA, P.; MARTÍN CULEBRAS, J.; RAMÍREZ RODRÍGUEZ, M. A.; GONZÁLEZ ANTÓN, R.; DEL ARCO AGUILAR, M. C.; SANTANA SANTANA, A. y MENDIENTA PINO, C.A. (1999): "Pozos con cámara de factura antigua en Rubicón (Lanzarote)", en *VIII Jornadas de Estudios sobre Lanzarote y Fuerteventura*. Cabildo de Lanzarote, pp. 367-419.
- BENÍTEZ PADILLA, S. (1959): *Gran Canaria y sus obras hidráulicas*. Las Palmas.
- CABILDO DE FUERTEVENTURA-CAJA DE CANARIAS: *El paisaje del agua en Fuerteventura* (2011). Madrid.
- CABILDO DE INSULAR DE GRAN CANARIA (2000). *Plan Hidrológico de Gran Canaria* (2000).
- CABRERA, M. C. y CUSTODIO, E. (2004): «Groundwater flow in a volcanic-sedimentary coastal aquifer: Telde area, Gran Canaria, Canary Islands, Spain», en *Hydrogeology Journal*, 12 (3), 1431-2174.

- CABRERA, M. C. y CUSTODIO, E. (2008): «Hidrogeología y recursos hídricos en Gran Canaria», en *La cultura del agua en Gran Canaria*, 13-24. Ed. Consejería de Obras Públicas y Transportes del Gobierno de Canarias.
- CABRERA, M. C. y CUSTODIO, E. (2011): «La investigación hidrogeológica en Canarias desde el proyecto SPA-15» en M.C. Cabrera, J. Jiménez y E. Custodio (eds.): *El conocimiento de los recursos hídricos en Canarias cuatro décadas después del proyecto SPA-15*, 109-116. Ed. AIH-GE.
- CASTRO NÚÑEZ, U. (2007): «El Calabazo», en revista digital bienmesabe.org. nº 175, 9 de Septiembre de 2007 (c. 11-IX-2011).
- CRÍADO HERNÁNDEZ, C. (2002): *Breve e incompleta historia del antiguo lago de la ciudad de San Cristóbal de La Laguna*. Ayuntamiento de San Cristóbal de La Laguna. Concejalía de Cultura y Patrimonio Histórico-Artístico.
- CUSTODIO, E. y CABRERA, M.C. (2008): «Síntesis de la hidrogeología de las Islas Canarias» en *Geotemas*, 10, 785-788. Ed. Sociedad Geológica de España.
- DÉNIZ, D. (1854): *Resumen histórico-descriptivo de las Islas Canarias*. 4 tomos mecanografiados. Biblioteca de El Museo Canario. Las Palmas, 1854.
- DÍAZ HERNÁNDEZ, R. (2008): «El paisaje agrario en Gran Canaria» y «Agua, patrimonio y paisaje en Canarias», en *La cultura del agua en Gran Canaria*, Consejería de Obras Públicas y Transportes del Gobierno de Canarias, pp. 55-72 y 117-142.
- DÍAZ RODRÍGUEZ, J. M. (1989): *Molinos de Agua en Gran Canaria*. Las Palmas de Gran Canaria.
- DOMÍNGUEZ MÚJICA, J.; MORENO MEDINA, C. y GINÉS DE LA NUEZ, C. (2005): *Agricultura y paisaje en Canarias. La perspectiva de Francisco María de León y Falcón*. Anroart Ediciones, Las Palmas de Gran Canaria.
- EQUIPO DE INVESTIGACIÓN «LA CULTURA DEL AGUA EN LANZAROTE» (2006): «La voz de una isla seca. Patrimonio oral», en *La cultura del agua en Lanzarote*. Consejería de Obras Públicas y Transportes del Gobierno de Canarias-Cabildo de Lanzarote. Islas Canarias.
- EXPÓSITO SUÁREZ, M.; GARCÍA CASANOVA, G.; GÓMEZ PESCOSE, C. E.; MARTÍN PÉREZ, A. y MOROS GIL, M. (1999): *La Cultura del Agua en Canarias. Materiales Curriculares*. Premios Innovación. Consejería de Educación del Gobierno de Canarias.
- FERNÁNDEZ ARMESTO, F. (1997): *Las Islas Canarias después de la conquista. La creación de una sociedad colonial a principios del siglo XVI*. Ediciones del Cabildo Insular de Gran Canaria. Cap. V. «Las aguas de riego», pp. 153-179. Las Palmas de Gran Canaria.
- FERNÁNDEZ GONZÁLEZ, E.: (1984): «Curiosidades sobre captaciones de agua en Gran Canaria», en *el Campo. Boletín de Información agrícola*. Banco de Bilbao. Bilbao. [Original en Servicio Hidráulico, LAS PALMAS, legajos sueltos de presas, para el congreso].
- GALVÁN GONZÁLEZ, E. (1996): *El abastecimiento de agua potable a Las Palmas de Gran Canaria: 1800-1946*. Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria. Las Palmas de Gran Canaria.
- GLICK, T.F. (1972): «The Old World Background of The Irrigation System of San Antonio, Texas», en *Southwestern Studies Monograph* Nº 25. The University of Texas at El Paso. Texas Western Press.
- GÓMEZ GÓMEZ, M.A. (2009): «Aprovechamiento del agua en Canarias durante antiguo régimen» (en línea). (Islas Canarias, España), Mayo 2009 (ref. 10 de Junio 2009), en revista *Canarii*. Disponible en World Wide Web; <<http://www.revistacanarii.com/canarii/15/aprovechamiento-del-agua-en-canarias-durante-el-antiguo-regimen>>
- GÓMEZ GÓMEZ, M.A. (2006): «La vida en torno al agua. Usos y aprovechamientos históricos», en *Agua del Cielo. Documentos para la Historia de Canarias*. Gobierno de Canarias. Dirección General del Libro, Archivos y Bibliotecas. Archivo Histórico Provincial de Santa Cruz de Tenerife. San Cristóbal de La Laguna.
- GÓMEZ LEÓN, R. (2001): «Agua, sudor y lágrimas: Pinolere y el trabajo en las galerías», en *El Pajar. Cuadernos de Etnografía Canaria*, La Orotava, pp. 4-25.
- GONZÁLEZ GONZÁLEZ, J.J (2010): *Canales y tuberías hasta 1972. Gran Canaria. Un inventario de bienes de interés etnográfico...*

- GONZÁLEZ GONZÁLEZ, J.J. (2012): *Valoración del Patrimonio Hidráulico en Gran Canaria: presas, estanques, pozos, galerías, canales y tuberías*. Las Palmas de Gran Canaria, 94 pp.
- GONZÁLEZ GONZÁLEZ, J.J. (2005): *Tengamos agua y lo tendremos todo. Las grandes presas de Gran Canaria*. II Congreso Nacional de Historia de las Presas. Sociedad Española de Presas y Embalses. Ministerio de Medio Ambiente, Burgos. http://bdigital.ulpgc.es/digital/texto/pdf/0314959_00000_0000.pdf.
- GONZÁLEZ GONZÁLEZ, J.J. (2008): "Las grandes presas de Gran Canaria. Toponimia, propiedad, tipologías y construcción", en *La cultura del agua en Gran Canaria*, Consejería de Obras Públicas y Transportes del Gobierno de Canarias. Las Palmas de Gran Canaria, pp. 143-166.
- GONZÁLEZ MORALES, A. (1993): "Aprovechamientos de las aguas y sistemas de riego en Fuerteventura", en *V Jornadas de Estudios sobre Fuerteventura y Lanzarote*, Servicio de Publicaciones del Cabildo Fuerteventura, Tomo II. Puerto del Rosario, pp. 13-40.
- GONZÁLEZ MORALES, A. (2006): *El agua en Lanzarote*. Anroart Ediciones. Las Palmas de Gran Canaria.
- GONZÁLEZ NAVARRO, J. (2008): «El patrimonio hidráulico en la prehistoria de Gran Canaria», en *La cultura del agua en Gran Canaria*, Consejería de Obras Públicas y Transportes del Gobierno de Canarias. Las Palmas de Gran Canaria, pp. 25-34.
- GONZÁLEZ RODRÍGUEZ, J. M. (2006): "De gruesas, dulas, cantoneras y otros sistemas de regulación del caudal en los nacientes y atarjeas de Canarias", en *La Cultura del Agua*, Anroart Ediciones, Las Palmas de Gran Canaria, pp. 251-268.
- GONZÁLEZ RODRÍGUEZ, J. M. (2009): "El caso de Lanzarote, la obsesión por el agua" en *Canarii*, nº 11, mayo de 2009. Las Palmas de Gran Canaria.
- GONZÁLEZ RODRÍGUEZ, J. M. (1991): "Tecnología popular tradicional de los sistemas de riego en Canarias", en *Anuario de Estudios Atlánticos*, nº 37, pp. 467-497. Las Palmas de Gran Canaria.
- GONZÁLEZ RODRÍGUEZ, J.M. (1991): "Tecnología popular tradicional de los sistemas de riego en Canarias" en *Anuario de Estudios Atlánticos*, nº 37, pp. 467-497. Las Palmas de Gran Canaria.
- GONZÁLEZ RODRÍGUEZ, J.M. (2010). *El agua en Canarias. Una visión histórica. Catálogo*. Instituto de Estudios Canarios-Instituto de Estudios Medievales y Renacentistas de La Universidad de La Laguna. San Cristóbal de La Laguna.
- GUERRA MARRERO, J.L. (2000): «El mercado del agua en Canarias», en *Jornadas técnicas de aguas subterráneas y abastecimiento urbano* [Editores: Fernández Rubio, Fernández Sánchez, et al.] Instituto Tecnológico GeoMinero de España Ministerio de Medio Ambiente. Madrid. ISBN 84-7840-393-0.
- HERNÁNDEZ GONZÁLEZ, M. (2000): "Los artesanos canarios en la Venezuela colonial: los constructores de acequias" en *El Pajar: Cuadernos de Etnografía Canaria*. Nº 7. pp. 47-49. La Orotava. Santa Cruz de Tenerife.
- HERNÁNDEZ GONZÁLEZ, M. (2001): "Las labores canarias de piedra en América" en *El Pajar: Cuadernos de Etnografía Canaria*. Nº 9. pp. 134-137. La Orotava. Santa Cruz de Tenerife.
- HERNÁNDEZ GONZÁLEZ, M. (2001): "Labores canarias de piedra en América (las destiladeras y las acequias)", en *El Pajar: Cuadernos de Etnografía Canaria*, nº 9, pp. 134-137. La Orotava. Santa Cruz de Tenerife.
- HERNÁNDEZ GONZÁLEZ, M. (2006): "Manifestaciones religiosas de la acción del agua en la sociedad canaria del Antiguo Régimen", en *La Cultura del Agua*, Anroart Ediciones, Las Palmas de Gran Canaria, pp. 190-249.
- HERNÁNDEZ GUTIÉRREZ, S. (2006): "Agua y arquitectura tradicional", en *La cultura del agua en Lanzarote*. Consejería de Obras Públicas y Transportes del Gobierno de Canarias-Cabildo de Lanzarote. Islas Canarias, pp. 269-286.
- HERNÁNDEZ GUTIÉRREZ, S. y GUERRA DE PAZ, F. (2006): *La Huella del Agua. Canarias*. Gobierno de Canarias. Consejería de Infraestructuras, Transporte y Viviendas. Dirección General de Aguas. Islas Canarias.

- HERNÁNDEZ MARTÍN, F. M. (2011): *Apuntes sobre el Patrimonio Etnográfico de Tenerife*. Asociación Cultural "Pinolere. Proyecto Cultural". La Orotava. Tenerife. «Cap. IV. El Patrimonio Hidráulico. Arquitecturas del Agua», pp. 72-121».
- HERNÁNDEZ PADRÓN, A. de J. y JIMÉNEZ MEDINA, A. M. (2001): "Fuentes públicas de Arucas. Gran Canaria", en *El Pajar. Cuadernos de Etnografía Canaria*, nº 9, pp. 94-100. La Orotava. Santa Cruz de Tenerife.
- HERNÁNDEZ PÉREZ, M^a.V. (2010): *El riego del Calabazo* (I y II). Conferencia de ingreso en la Academia Canaria de La Lengua, publicado en la revista digital:
- HERNÁNDEZ, M^a V. y HERNÁNDEZ, A. (1990). "El calabazo", en VV.AA. *Juegos Deportivos Tradicionales* (pp. 197-219). Centro de la Cultura Popular Canaria. Santa Cruz de Tenerife.
- HIDALGO SÁNCHEZ, M. (1998): "El trabajo en los pozos. Oficios tradicionales, presente y futuro". *II Jornadas de Etnografía*. 15 de marzo de 1998. Vega de Mateo. <http://www.bienmesabe.org/noticia.php?id=13611&t=1157349600&s=0>
- <http://www.bienmesabe.org/noticia/2007/Septiembre/el-calabazo>
- <http://www.bienmesabe.org/noticia/2010/Abril/riego-al-calabazo-tramas-para-su-pervivencia-i> (c. 11-IX-2011).
- <http://www.presasengrancanaria.com/p/descarga-de-articulos.html> (c. 15-XI-2011).
- IES Arucas Domingo Rivero (2009): "Una ruta por el agua de Arucas. Las Cantoneras", *Rev. N^o 284 de Bienmesabe.org* (consulta: 15 de noviembre de 2009). <http://www.bienmesabe.org/noticia.php?id=43431>
- JIMÉNEZ MEDINA, A. M.; ZAMORA MALDONADO, J. M. y HERNÁNDEZ PADRÓN, A. de J. (2008): "De barro eres y en barro te convertirás: los estanques de barro en Arucas, Gran Canaria. Un acercamiento a la infraestructura hidráulica de finales del siglo XIX y comienzos del siglo XX", en *El Pajar. Cuaderno de Etnografía Canaria*, nº 26, pp. 80-91. La Orotava. Santa Cruz de Tenerife.
- LAHORA ARÁN, C. (2005): *El ecosistema agrario Lanzaroteño*. Edita Cabildo Insular de Lanzarote. M-27655-2005.
- Lorenzo Perera, M. J. (2006): "El agua en Canarias. Un negocio doblemente subterráneo". *Rev. n^o 115 de Bienmesabe.org* (consulta: 15 de noviembre de 2009). <http://www.bienmesabe.org/noticia.php?id=12519>.
- LORENZO TENA, A. (2010): *Molinos de Agua: historia de los ingenios hidráulicos harineros de La Palma*. Ediciones Idea. Santa Cruz de Tenerife.
- MACÍAS HERNÁNDEZ, A.M. (2000): "De Jardín de las Hespérides a Islas Sedientas. Por una historia del agua en Canarias, C. 1400-1990" en *El Agua en la Historia de España*, pp. 169-271. Edit. B. López y Melgarejo M. Universidad de Alicante. Salamanca.
- MACÍAS HERNÁNDEZ, A.M. (2008): "Notas sobre la historia del agua", en *La cultura del agua en Gran Canaria*, Consejería de Obras Públicas y Transportes del Gobierno de Canarias, pp.35-54.
- MARTÍN GONZÁLEZ, M. A.; LORENZO HERNÁNDEZ, A.; FERNÁNDEZ PÉREZ, M.; MARTÍN GONZÁLEZ, M. C.; CROSSA FERNÁNDEZ, J. F.; GARCÍA MARTÍN, M^a. C.; LEGUGA DELGADO, J.A. y VALLINA ALONSO, M^a. L. (2000): *Los Orígenes de la Electricidad en La Palma. El Electrón*. Cabildo de La Palma-Caja de Canarias. Colegio de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Tenerife. La Palma. Islas Canarias.
- MARTÍN MARTÍN, V. (1991): *Agua y agricultura en Canarias: el Sur de Tenerife*. Editorial Benchomo. Colección Tasufra nº 4. Las Palmas-Santa Cruz de Tenerife.
- MARTÍN MORENO, M. (2010): "Pequeña Edad del Hielo en el Alto Teide (Tenerife, islas Canarias). Menciones históricas y morfogénesis periglaciaria" en *Ería. Revista Cuatrimestral de Geografía*, nº 83, Universidad de Oviedo, pp. 331-342.
- MARTÍN RODRÍGUEZ, E. (2008): "El hombre y el agua en las Canarias preeuropeas. La Palma como paradigma", en *La cultura del agua en La Palma*. Gobierno de Canarias. Consejería de Infraestructuras, Transporte y Viviendas. Dirección General de Aguas. Islas Canarias.
- MEDINA PÉNATE, E. (1999): *Adeyahamen. Debajo del Agua. Localización y análisis comparativo de las principales cantones de Telde*. Ayuntamiento de Telde.

- MERINO MARTÍN Pedro (2005): "La construcción en 1786 del Pozo de la Nieve en Santa Cruz de La Palma", en *Revista de Estudios Generales de la Isla de La Palma*, nº, pp. 351-372.
- NAVARRO GARCÍA, E. (2006): «Resumen histórico farmacológico-terapéutico de las aguas de Teror, en *La Cultura del Agua. III Jornadas de Patrimonio Cultural de Teror*. Anroart Ediciones.
- NAVARRO GARCÍA, E. (ED.), LÓPEZ GARCÍA, J.S., SANTANA RAMÍREZ, J.I., SUÁREZ ALEJANDRO, P., HERNÁNDEZ ROMERO, F., VIÑA BRITO, A. Y ACOSTA PADRÓN V. (2008): *Heredamientos de Aguas de Canarias*, Eduardo Navarro García-Ayuntamiento de Arucas, Arucas.
- NAVARRO GARCÍA, E. Y ALONSO DÍAZ, S. (2005): «Aguas minerales de Telde a través de nuestros investigadores e historiadores», en *Guía Histórico Cultural de Telde*, pp. 55-58.
- NAVARRO GARCÍA, E. Y ALONSO DÍAZ, S. (2006): «Aguas minerales del Pozo de la Fuente. Santa María de Guía. Gran Canaria», en *Canarias médica y quirúrgica*, septiembre-diciembre de 2006, pp. 62-66.
- NAVARRO GARCÍA, E., ALONSO DÍAZ, S. Y SAN MARTÍN BACAICOA, J. (2003): «Resumen histórico farmacológico terapéutico de las aguas minerales de Firgas», en *Canarias médica y quirúrgica*, mayo-agosto 2003, pp. 50-53.
- NAVARRO MEDEROS, J.F. Y HERNÁNDEZ MARRERO, J.C. (2008): «El agua en la prehistoria. La relación de los antiguos gomeros con el agua», en *La cultura del agua en La Gomera*. Gobierno de Canarias. Consejería de Infraestructuras, Transporte y Viviendas. Dirección General de Aguas. Islas Canarias, pp. 36-39.
- ORTEGA OJEDA, G. (1997): *Léxico y fraseología de Gran Canaria*. Ediciones del Cabildo de Gran Canaria.
- ORTEGA OJEDA, G. (2006): "El reflejo de la cultura del agua en Teror", en *La Cultura del Agua. III Jornadas de Patrimonio Cultural*. Ediciones Anroart. Las Palmas de Gran Canaria.
- PAIS PAIS, F. (2008): «Los benahoaritas y el agua: una cuestión de supervivencia», en *La cultura del agua en La Palma*. Gobierno de Canarias. Consejería de Infraestructuras, Transporte y Viviendas. Dirección General de Aguas. Islas Canarias, pp. 59-76.
- PAIS PAIS, F.; PELLITERO LORENO, N. Y ABREU DÍAZ, C.A. (2007): *Sistemas de aprovechamiento del agua entre los Benahoritas y su pervivencia en la época histórica*. Cuadernos CICOP para la divulgación del Patrimonio Cultural y Natural, nº 12. San Cristóbal de La Laguna. Tenerife.
- PALLARES PADILLA (2006): «Del término Dise... y otros topónimos lanzaroteños referidos al agua dulce», en *La cultura del agua en Lanzarote*. Consejería de Obras Públicas y Transportes del Gobierno de Canarias-Cabildo de Lanzarote. Islas Canarias.
- PERDOMO CERPA, M. (2006): "Firgas. El berro y sus cosecheros", en *El Pajar. Cuadernos de Etnografía Canaria*. La Orotava. Santa Cruz de Tenerife, pp. 79-81.
- PERDOMO MOLINA, A. (2002): "El sistema de cultivo en gavias en Fuerteventura (Islas Canarias, España): la gestión del agua en un espacio árido", en *Antología sobre pequeño riego. Volumen III. Sistemas de riego no convencionales*. Ed. Jacinta Palermo Viqueira, Colegio Postgraduados México.
- PERDOMO MOLINA, A. (2000): "Los manantiales de ñames de Anaga", en *El Pajar. Cuadernos de Etnografía Canaria*. La Orotava. Santa Cruz de Tenerife.
- PERDOMO MOLINA, A.; Y DUPUIS, I. (2004): *Los nateros: un sistema de recolección de agua adaptado a las zonas áridas y montañosas de Canarias*. Revista de Cultura Popular Canaria Tenique. Nº 6. pp. 235-252.
- PERERA BETANCORT M. A. (2006): "Historia del agua en Lanzarote" en *La cultura del agua en Lanzarote*. Consejería de Obras Públicas y Transportes del Gobierno de Canarias-Cabildo de Lanzarote. Islas Canarias, pp. 145-216.
- PERERA BETANCORT M. A. (1999 y 2000): "La memoria del agua en Lanzarote" I y II, en *El Pajar Cuadernos de Etnografía Canaria*. Pinolere, nº 6 y nº 7. La Orotava. Santa Cruz de Tenerife.
- PERERA BETANCORT M. A. (2006): "El agua en la cultura aborigen de los majos de Lanzarote" en *La cultura del agua en Lanzarote*. Consejería de Obras Públicas y Transportes del Gobierno de Canarias-Cabildo de Lanzarote. Islas Canarias, pp. 115-144.

- PERERA BETANCORT M. A. y HERNÁNDEZ GUTIÉRREZ, A. (2006): "Agua e ingeniería popular" en *La cultura del agua en Lanzarote*. Consejería de Obras Públicas y Transportes del Gobierno de Canarias-Cabildo de Lanzarote. Islas Canarias, pp. 217-268.
- PÉREZ BARRIOS, C. R. (2006): "Abastecimiento doméstico e infraestructuras hídricas en el Sur de Tenerife en el tránsito del siglo XIX al XX", en *El Pajar. Cuadernos de Etnografía Canaria*, nº 22. La Orotava. Santa Cruz de Tenerife.
- PÉREZ MARRERO, L. (2003): *Patrimonio e Innovación en la obtención y aprovechamiento de recursos hídricos en Canarias*. Ayuntamiento de Arucas.
- PÉREZ VIDAL, J. (1967): "La vivienda canaria: datos para su estudio", en *Anuario de Estudios Atlánticos*, nº 13, Madrid-Las Palmas, pp. 41-113.
- Pérez, Manuel: "Un siglo de agua, un siglo de vida". *Rev. nº 1* de Bienmesabe.org (consulta: 15 de noviembre de 2009). <http://www.bienmesabe.org/noticia.php?id=37>
- PUERTA CANSECO, Juan de la (1897): *Descripción geográfica de las Islas Canarias*. p. 36 y 53 [reedición en 2004 por E. Idea, Santa Cruz de Tenerife].
- REYES AGUILAR, A. (1989): *Estrategias hidráulicas en la isla de La Gomera*. Museo Etnográfico-Cabildo de Tenerife-Cabildo de La Gomera. Santa Cruz de Tenerife.
- RODRÍGUEZ CAMPOS, L. (1993): *Proyecto de investigación-acción para la elaboración de materiales curriculares sobre la cultura del agua en Tenerife*. Dirección General de Ordenación e Innovación Educativa del Gobierno de Canarias.
- RODRÍGUEZ DELGADO O., 2009. "El Barranco del Agua de Güímar, un espacio natural de gran interés botánico, turístico y etnográfico". In Beltrán Tejera, E., J. Afonso-Carrillo, A. García Gallo & O. Rodríguez Delgado (eds.): *Homenaje al Profesor D. Wilfredo Wildpret de la Torre*: 181-212. Instituto de Estudios Canarios. La Laguna (Tenerife, Islas Canarias). Monografía LXXVIII.
- RODRÍGUEZ DELGADO, O., WILDRET DE LA TORRE, W., RODRÍGUEZ NAVARRO, M.L. (2006): Capítulo I. Evolución histórica de la flora y la vegetación, a través de fuentes escritas y gráficas. In: RODRÍGUEZ DELGADO, O., y ELENA-ROSELLÓ, R. (eds.), *Evolución del paisaje vegetal del Parque Nacional del Teide*: 11-243. Parques Nacionales, Ministerio de Medio Ambiente.
- RODRÍGUEZ, D.; MARTÍN, L.F. y CABRERA, M.C. (2008): «Hidrogeología y recursos hídricos en Gran Canaria». en F.J. Pérez-Torrado y M.C. Cabrera (eds.): *GeoGuías*, 5, 73-88. Ed. Sociedad Geológica de España.
- ROMERO MARTÍN, L. E.; RUIZ FLAÑO, P. y HERNÁNDEZ CALVENTO, L. (2003): "El espacio de bancales en el tramo inferior de la Cuenca del Guinguada: características ecoantrópicas", en *Vegueta*, nº 7, ULPGC. Las Palmas de Gran Canaria, pp. 211-227.
- ROMERO, L.; RUIZ, P.; MÁYER, O.; PÉREZ CHACÓN E. y HERNÁNDEZ L. (2006): «Clasificación y caracterización geológica de los bancales de la cuenca del Guinguada (Gran Canaria, Islas Canarias, España)», en *Actes de les Jornades Sobre Terrasses I. Prevenció de Riscos Naturals, Mallorca, 14, 15 i 16 de setembre, 2006*, pp. 65-76.
- SABATÉ BEL, F. (1993): *Burgados, tomates, turistas y espacios protegidos. Usos tradicionales y transformaciones de un espacio litoral del sur de Tenerife...*, Servicio de Publicaciones de la Caja General de Ahorros de Canarias. Santa Cruz de Tenerife.
- SÁNCHEZ PERERA, S. (2008): "La arqueología del agua en la isla de El Hierro", en *La cultura del agua en El Hierro*. Gobierno de Canarias. Consejería de Infraestructuras, Transporte y Viviendas. Dirección General de Aguas. Islas Canarias, pp. 41-64.
- SÁNCHEZ VALERÓN, R. (2011): «Aljibes de las medianías de Ingenio, patrimonio etnográfico de gran valor», en *El Pajar Cuadernos de Etnografía Canaria*. Asociación Cultural "Pinolere Proyecto Cultural", nº 29, agosto de 2011, pp. 217-220.
- SÁNCHEZ VALERÓN, R.: *El Patrimonio hidráulico de Guayadeque, 'heredamientos', minas, pozos, molinos... Y siglos de conflictos*. Inédito, en prensa (2012).
- Santamarta Cerezal, J.C (2009): La minería del agua en el archipiélago canario. *Sociedad Española para la Defensa del Patrimonio Geológico y Minero*. De Re Metallica, 12 1-8. Madrid.

- SANTAMARTA CEREZAL, J.C. (2009): *Singularidades sobre la construcción, planificación y gestión de las obras y recursos hídricos subterráneos en medios volcánicos. Estudio del caso en las Islas Canarias occidentales*. Tesis (Doctoral), E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos (UPM) [En línea]. Universidad Politécnica de Madrid 2010, [ref. de 15 Octubre 2010]. Disponible en Web: <http://oa.upm.es/3389/>
- SANTANA RAMÍREZ, J. I. (2007): “La Fuente Pública de Telde, efímera memoria del agua”, en *Guía Histórico Cultural de Telde*, pp. 77-90, Telde.
- SANTANA RAMÍREZ, J. I. (2006): “La fuente de Telde: recuperación de un patrimonio hidráulico”, en *El Pajar. Cuadernos de Etnografía Canaria*. La Orotava. Santa Cruz de Tenerife.
- SOLER LICERAS, C. (2008): «El pozo de Los Padrones», en *La cultura del agua en El Hierro*. Gobierno de Canarias. Consejería de Infraestructuras, Transporte y Viviendas. Dirección General de Aguas. Islas Canarias. pp. 121-138.
- SPA-15 (1975): *Estudio científico de los recursos de agua en las Islas Canarias*.
- SUÁREZ GRIMÓN, V. (2006): “Necesidad y legalidad: dos caras del conflicto por el agua entre Teror y el heredamiento de Tenoya”, en *La Cultura del Agua. III Jornadas de Patrimonio Cultural de Teror*. Anroart Ediciones. Las Palmas de Gran Canaria.
- SUÁREZ GRIMÓN, V. (2007): *Las Bajadas de la imagen de Nuestra Señora del Pino a Las Palmas (1607-1815)*, Anroart Ediciones, S. L., Las Palmas de Gran Canaria, 540 p.
- SUÁREZ GRIMÓN, V. y TRUJILLO YÁNEZ, G. (Editores) (2006): *La Cultura del Agua. III Jornadas de Patrimonio Cultural de Teror*. Anroart Ediciones. Las Palmas de Gran Canaria-Madrid.
- SUÁREZ MORENO, F (2006): “La cultura de los pozos en Canarias”, en *El Pajar. Cuadernos de Etnografía Canaria*, nº 22, La Orotava. Santa Cruz de Tenerife.
- SUÁREZ MORENO, F (2007): “El Patrimonio Hidráulico en Canarias”, en *Arquitecturas, Ingenierías y Culturas del Agua*, INCUNA, Asociación de Arqueología Industrial. Colección “Los ojos de la memoria”, Gijón. Asturias, pp. 173-192.
- SUÁREZ MORENO, F. (2001): “La Noria de Jinámar: singular ingeniería hidráulica del siglo XIX...”, en *Revista Histórico Cultural de Telde*, Telde, pp. 54-66.
- SUÁREZ MORENO, F. (2001): “La piedra, la cal y otros materiales en la ingeniería hidráulica canaria”, en *El Pajar. Cuadernos de Etnografía Canaria*, La Orotava, pp. 84-93. Santa Cruz de Tenerife
- SUÁREZ MORENO, F. (2002): “Las minas de agua en Canarias”, en *Antología sobre pequeño riego. Volumen III. Sistemas de riego no convencionales*. Ed. Jacinta Palerm Viqueira, Colegio Post-graduados México.
- SUÁREZ MORENO, F. (1994): *Ingenierías históricas de La Aldea*. Cabildo de Gran Canaria. Las Palmas de Gran Canaria.
- SUÁREZ MORENO, F. (2003): “Artifugios, maquinarias y trabajos en los pozos de Telde”, en *Revista Histórico Cultural de Telde*, Telde.
- SUÁREZ MORENO, F. (2003): *La Comunidad de Regantes Aldea de San Nicolás. Historia y estrategias hidráulicas*. 75º Aniversario de Fundación. La Aldea de San Nicolás. Gran Canaria.
- SUÁREZ MORENO, F. y SUÁREZ PÉREZ, A. (2005): *Guía del Patrimonio Etnográfico de Gran Canaria*. Cabildo de Gran Canaria. Las Palmas de Gran Canaria.
- TEIXIDOR CADENAS, C. (2010): “El agua del Pozo de Sabinosa, en El Hierro”, en revista *Rincones del Atlántico*, número doble 6 y 7, 2010, pp. 226-239.
- TEJERA GASPAS, A. y AZNAR VALLEJO, E. (2004): *San Marcial de Rubicón*. Artemisa Ediciones. Pp. 51-67.
- TORRES CABRERA, J. (2006): *La cultura del agua en Lanzarote*. Consejería de Obras Públicas y Transportes del Gobierno de Canarias-Cabildo de Lanzarote. Islas Canarias.
- VVAA (2006): *Agua del Cielo. Documentos para la Historia de Canarias*. Gobierno de Canarias. Dirección General del Libro, Archivos y Bibliotecas. Archivo Histórico Provincial de Santa Cruz de Tenerife. San Cristóbal de La Laguna.

Entorno geológico y materiales en las islas volcánicas. El archipiélago canario

José A. Rodríguez Losada
Luis E. Hernández Gutiérrez

1. Introducción

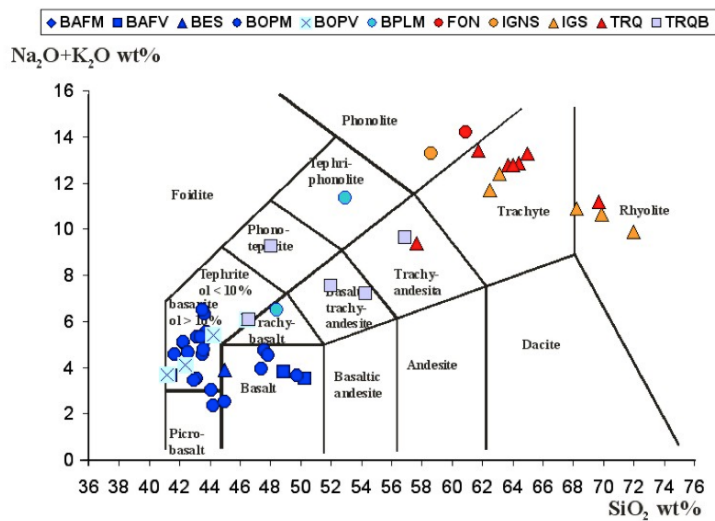
Las Islas Canarias constituyen una de las regiones volcánicas más interesantes del planeta ya que en ellas han acontecido la mayoría de los procesos volcánicos que se pueden dar, pudiéndose encontrar un amplio espectro de materiales y estructuras volcánicas. Por este motivo, cualquier estudio aplicado de Ciencias de la Tierra que se realice en Canarias es fácilmente extrapolable a cualquier otra región volcánica del mundo.

El archipiélago canario, está formado por un conjunto de 7 islas y 4 islotes, cubriendo un área total de unos 7500 km². Se encuentra situado por término medio a 1400 Km de las costas más próximas de la península ibérica y a unos 100 Km al Oeste de la costa occidental africana. Asociado al archipiélago existen una serie de montañas submarinas que se extienden hasta 500 km hacia el N, donde se localiza el Banco de la Concepción y el Banco de Dacia mientras que al sur del Archipiélago se extiende el grupo de Montañas Submarinas Saharianas. Desde el punto de vista biogeográfico, las Islas Canarias forman parte de la región de Macaronesia (del griego “Islas Felices”). Esta región está formada por los archipiélagos de Azores, Madeira, Islas Salvajes, Canarias y Cabo Verde.

Desde el punto de vista geológico, Canarias representa un buen ejemplo de control estructural en el desarrollo del volcanismo asociado a islas oceánicas. El área volcánica de Canarias, está asentada en una zona de transición oceánico-continental, en

el interior de la litosfera africana, sobre la corteza oceánica y muy próxima al límite entre la corteza oceánica atlántica y la corteza continental africana. Entre Canarias y África se localiza una importante cuenca cuyos sedimentos alcanzan los 10 Km de espesor. Ya hacia el Oeste del archipiélago se extienden las llanuras abisales salpicadas por un gran número de edificios volcánicos submarinos desde la región norteafricana del Haagar hasta las “White Mountains” en Norteamérica.

Tabla 3.1: Clasificación geoquímica de los litotipos de las Islas Canarias definidos en la tabla.



Los edificios insulares canarios se elevan desde los fondos marinos por lo que solo una pequeña parte de ellos es visible sobre el nivel del mar. Esto quiere decir que podemos ver directamente menos de un 10% de los edificios insulares. Es por ello que resultan del mayor interés los recientes estudios de los fondos marinos canarios en los que se han detectado numerosos edificios volcánicos e importantes depósitos de avalancha. Actualmente, parecen evidentes los efectos que sobre el archipiélago canario han ejercido las vecinas montañas del Atlas y el lento desplazamiento hacia el Este de la placa litosférica africana (del orden de 1 a 2 cm/año durante al menos los últimos 60 Ma). Desde el punto de vista geoquímico, las rocas volcánicas de Canarias, pertenecen a la serie ígnea alcalina, en este caso, asociada a volcanismo de intraplaca. Esta serie ígnea está formada por una secuencia de rocas cuya composición evoluciona desde términos indiferenciados, representados por basaltos, términos intermedios, representados por traquibasaltos y finalmente, términos más diferenciados o evolucionados, representados por traquitas y fonolitas (tabla.3.1).

2. Origen de las Islas Canarias

Las teorías científicas sobre el origen del archipiélago canario, surgen en la década de los sesenta de forma paralela al desarrollo de la actual tectónica de placas. La primera de las hipótesis fue la del punto caliente, desarrollada por Morgan en 1971 y Wilson en 1973, aplicada primeramente y de forma satisfactoria, en el archipiélago de Hawái. Según esta hipótesis, un penacho térmico originado en la base del manto terrestre sería la fuente de todos los magmas del archipiélago. Al estar dicho penacho en posición fija con respecto a la placa africana, desplazándose linealmente de Oeste a Este, se irían formando un conjunto de islas alineadas con edades decrecientes hacia el Oeste. Para acomodar este modelo a las peculiaridades del archipiélago canario, surgieron en la década de los noventa, nuevas ideas que no eran sino modificaciones de la antigua teoría del punto caliente: 1) El modelo de pompas, de Hoernle y Schmincke en 1993 y 2) la anomalía térmica laminar, de Hoernle y otros autores, en 1995. No obstante, como resultado de la gran cantidad de problemas planteados por la teoría del punto caliente, surgen en la década de los setenta, dos hipótesis alternativas al punto caliente y sus posibles variantes: La de la fractura propagante por Anguita y Hernán en 1975 y la hipótesis de los bloques levantados por Araña y otros autores en 1975.

La primera de ellas, establece que el archipiélago surgió sobre la prolongación de una gran fractura ENE-WSW procedente del Sur del Atlas y cuya actividad repetida y propagada de Este a Oeste, generó el magmatismo que daría lugar a las Islas Canarias. La segunda considera que las islas se elevaron a modo de bloques levantados a favor de grandes sistemas de fallas inversas.

En el año 2000 surge la hipótesis más reciente sobre el origen del archipiélago y constituye una propuesta de consenso basada en las anteriores ideas de los bloques levantados, la fractura propagante y la lámina térmica. Esta idea, desarrollada por Anguita y Hernán, establece la existencia, bajo Canarias, de zonas calientes asociadas a un penacho térmico residual, activo desde los comienzos de la apertura del Atlántico, hace 200 Ma. Por las características de este último esquema, en donde se consideran los aspectos más favorables de cada una de las teorías anteriores, ha sido denominada hipótesis de síntesis o unificadora. Con todo ello, todavía existen cuestiones por resolver y es por ello, que a pesar de todas las ideas surgidas, el debate sobre el origen de las islas Canarias todavía sigue en pie.

3. Etapas de formación de las Islas Canarias

Todas las islas del archipiélago, pasan, durante su formación, por unas etapas similares a lo largo de su historia y que se reflejan en una serie de grandes unidades volcanoestratigráficas, comunes en todas las islas; si bien, el desarrollo de cada una de ellas se produce en tiempos diferentes en las distintas islas y solo son observables en 3 o probablemente en 4 de las islas. Estas unidades son dos: 1) Complejo Basal y 2) Series volcánicas subaéreas. De ellas, los complejos basales solo son visibles en las islas de Fuerteventura (macizo de Betancuria), La Gomera (caldera de Vallehermoso) y La Palma (caldera de Taburiente). Así mismo, algunos autores han sugerido recientemente, la existencia de complejo basal visible en el Norte de la isla de Tenerife (Taganana), si bien, este último extremo todavía está pendiente de confirmación posterior.

Los complejos basales, unidad más antigua de las islas en las que es visible, comienzan a formarse hace 70 Ma en el fondo oceánico de la futura isla de Fuerteventura, proceso que se extenderá a lo largo de 45 Ma hasta sus últimas manifestaciones de hace 25 Ma. En La Gomera, la misma unidad se desarrollará entre los 25 a 19 Ma y en La Palma, en torno a los 4 Ma. La característica común de los complejos basales es que están constituidos por rocas plutónicas, lavas submarinas, sedimentos y densos enjambres de diques. Las series volcánicas subaéreas se desarrollan posteriormente sobre los edificios volcánicos submarinos constituyendo desde sus inicios, las áreas emergidas de las islas. Esta segunda gran unidad volcanoestratigráfica se desarrolla en varias etapas, comenzando todas ellas por la construcción de volcanes en escudo hace entre 20 y 15 millones años en las islas orientales y 2 Ma en La Palma y El Hierro. Restos de estos volcanes en escudo son las denominadas series basálticas antiguas o basaltos tabulares de la Serie I. Posteriormente, se suceden dos ciclos volcánicos conocidos en la literatura como Serie Intermedia y Serie Reciente, esta última coronada por las erupciones históricas de los últimos 500 años.

En la isla de Lanzarote se distinguen tres ciclos volcánicos diferentes: 1) El de los basaltos tabulares (entre 15 y 6 Ma) visibles en los macizos de Famara al Norte y los Ajaches al Sur; 2) ciclo volcánico intermedio (entre 2-1 Ma) y 3) ciclo reciente, que incluye las erupciones históricas.

En la isla de Fuerteventura, se distinguen tres ciclos importantes: 1) el complejo basal (70-20 Ma), 2) el ciclo antiguo o basaltos tabulares antiguos (entre 19 y 13 Ma) y 3) edificios volcánicos recientes (conos de cinder y coladas basálticas, desde hace 4 Ma). En el complejo basal se encuentran sedimentos y lavas submarinas con edades

de hasta 65 Ma. Las etapas de intrusión plutónica se repiten en varias fases, una en torno a los 55 Ma, otra hace 35 Ma y la última hace 22 Ma y caracterizadas por el emplazamiento de gabros y piroxenitas. En la última de ellas, encontramos todo un cortejo de gabros y piroxenitas, sienitas y carbonatitas. Un evento muy importante en la evolución de Fuerteventura fue el dismantelamiento erosivo hacia el W de parte de los edificios Central y de Jandía hace 12 Ma, quedando el complejo basal expuesto en superficie. La causa de tal dismantelamiento erosivo no está clara, pudiendo haberse tratado de grandes deslizamientos gravitacionales o por la actividad de una gran fractura cortical de dirección aproximadamente similar a la de la costa Oeste.

En Gran Canaria, se distinguen cuatro ciclos fundamentales: 1) basaltos tabulares (15- 14 Ma), 2) complejo traquítico-sienítico (14-8.5 Ma, 3) ciclo Roque-Nublo (3.5 Ma) y 4) conos volcánicos y lavas recientes (desde hace 3 Ma). En esta isla, mientras que los afloramientos de basaltos tabulares y del complejo traquítico-sienítico de la caldera de Tejeda se extienden a lo largo de la mitad suroccidental, los volcanes recientes se extienden predominantemente a lo largo de la mitad nororiental y las brechas y lavas del ciclo Roque Nublo ocupan preferentemente el sector central, con ramificaciones al NE y hacia el S.

En Tenerife, se distinguen cuatro grandes estructuras o unidades volcanoestratigráficas: 1) Arco de Taganana, formado por materiales submarinos, rocas plutónicas félsicas, un complejo filoniano muy denso con diques básicos y félsicos y brechas tectónicas (anterior a 6 Ma), 2) basaltos tabulares (entre 11 y 3.5 Ma), visibles en los macizos de Anaga, Teno y Roque del Conde. Este ciclo, dominado por basaltos, aparece coronado, hacia el final, por la emisión de rocas fonolíticas. 3) edificio Cañadas, estratovolcán formado inicialmente por basaltos y traquibasaltos y coronado finalmente por potentes emisiones fonolíticas (entre 2.5 y 0.15 Ma) 4) dorsal de La Esperanza, formada por estratovolcanes y conos de cinder alineados a lo largo de una dirección NE-SW (entre 1- 0.7 Ma) y 5) conos de cinder y lavas recientes basálticas (desde los últimos 0.15 Ma hasta las erupciones históricas de los 500 años más recientes). Entre las grandes estructuras volcánicas constructiva, destaca la del complejo estratovolcánico Teide-Pico Viejo con una cota de 3718 m. Este edificio formado desde hace 0.15 Ma, ha crecido en el interior de otra gran estructura de destrucción: la caldera de las Cañadas, de 16 km de diámetro excavada en el edificio Cañadas en varios episodios entre 0.7 y 0.15 Ma. Sobre su génesis todavía persiste el debate entre dos ideas fundamentales: Una es la que liga el origen de la caldera al colapso de la cúpula del edificio Cañadas tras el vaciado parcial de la cámara magmática y la otra es la que explica su origen como debido a grandes deslizamientos catastróficos o “land-slides” hacia el Norte, tras la desestabilización del estratovolcán Cañadas. Otras estructuras destacables son los valles de Güimar y la Orotava (pos-

terior al anterior), grandes depresiones de deslizamiento gravitacional de 10 km de anchura, abiertas al Sur y al Norte respectivamente, excavados a ambos lados del edificio de la dorsal de la Esperanza hace entre 0.7 y 0.5 Ma aproximadamente.

La isla de La Gomera, es la única de todo el archipiélago sin actividad volcánica reconocida en el último millón de años. Está formada por cuatro ciclos magmáticos: 1) complejo basal (entre 20-14 Ma), 2) ciclo antiguo, integrado por los basaltos antiguos y el complejo Traquítico-fonolítico (entre 11-9 Ma), 3) ciclo de los basaltos subrecientes (entre 9-7 Ma) y 4) ciclo reciente (4.5 Ma), formado por los basaltos horizontales y las intrusiones félsicas en forma de domo (serie de los Roques).

La isla de La Palma, está constituida por 3 grandes conjuntos de edificios subvolcánicos y volcánicos: 1) complejo basal (entre 4-3 Ma), 2) El conjunto de Cumbre Nueva al Norte (edificios de Taburiente I y II, Cumbre Nueva y Bejenado construidos hace entre 1.7-0.3 Ma) y 3) Cumbre Vieja (edificio más reciente, situado al Sur y construido desde hace 0.1 Ma). En esta isla cabe destacar un período destructivo de gran magnitud como fue el desplome hacia el SW de parte de Cumbre Nueva hace 0.5 Ma, dejando en la morfología una gran cicatriz en forma de arco de 10 km de largo, cóncavo al Oeste.

La isla del Hierro, es la de menor extensión del archipiélago (270 km²) y aparentemente presenta una mayor simplicidad geológica, destacando en ella, la emisión casi exclusiva de basaltos. Se pueden separar dos grandes conjuntos volcánicos: 1) basaltos antiguos del edificio Tiñor (entre 1.1 y 0.9 Ma), 2) El edificio de El Golfo (entre 0.5-0.1 Ma) y 3) volcanes post-Golfo (desde hace 15000 años). En la evolución de esta isla, destacan una serie de acontecimientos catastróficos en forma de grandes deslizamientos en masa gravitacionales y que dejaron en el Hierro unas cicatrices fácilmente reconocibles en la morfología isleña. Estos son los deslizamientos de El Julan (hace más de 0.16 Ma), el de Las Playas (aproximadamente hace 0.15 Ma) y por último el de El Golfo (hace 15.000 años) y que excavó la caldera del mismo nombre en forma de depresión semicircular de 15 km de diámetro.

4. Materiales

La geología de todo el Archipiélago Canario está dominada prácticamente en su totalidad por una sucesión de materiales y estructuras volcánicas. Secuencias de emisiones lávicas, así como de depósitos piroclásticos de composición muy variable, configuran un paisaje muy singular dentro del territorio nacional pero que, a nivel

regional, presenta contrastes extremos desde el punto de vista litológico, medioambiental, paisajístico e incluso meteorológico.

Toda la actividad volcánica efusiva de las Islas Canarias ha llevado a la construcción y crecimiento subaéreo del archipiélago, de forma que, actualmente, se encuentran en superficie, bien edificios volcánicos muy recientes, correspondientes a los últimos eventos volcánicos o bien escudos volcánicos y materiales muy antiguos y en general muy alterados de los cuales hoy queda visible una mínima parte de los que fueron en el Mioceno-Plioceno, es decir, hace unos cinco millones de años. Este es el caso de los macizos más antiguos de las distintas islas cuya antigüedad se puede inducir de los profundos y cerrados barrancos excavados por la continua erosión y que, al no haber sido rellenados por emisiones volcánicas más recientes, presentan una morfología en forma de agudas crestas, fondos de barranco muy profundos y angostos y laderas con pendientes que, en ocasiones, se aproximan a la verticalidad.

Las manifestaciones lávicas, independientemente del nivel volcanoestratigráfico al que pertenezcan, se clasifican en tres tipos fundamentales:

- 1) **Coladas lávicas con superficies denominadas en la literatura científica como “pahoehoe”.** Forman asentamientos de superficie muy suave y a veces modelada en forma de pliegues, denominadas lavas cordadas o en tripas (Fig. 3.1), en alusión al aspecto de su superficie. Este tipo de estructuras, en Canarias aparecen asociadas a emisiones lávicas de composición basáltica y se forman bajo una combinación de baja viscosidad y bajo régimen de emisión. Con frecuencia, llevan asociadas una red sublávica de túneles o tubos volcánicos de dimensiones muy variadas y cuya existencia tiene importantes implicaciones en proyectos de construcción o edificación.
- 2) **Coladas lávicas con superficies denominadas como “aa” y más conocidas en el ámbito local de Canarias como malpaíses.** En principio este tipo de estructuras se caracteriza por presentar unas superficies muy irregulares, agudas, cortantes y en general muy caóticas, por las cuales resulta extremadamente difícil caminar (Fig. 3.2). En las Islas Canarias, los malpaíses son mucho más abundantes que las superficies de tipo “pahoehoe”. Los malpaíses canarios están siempre ligados a pequeños edificios volcánicos denominados conos de cinder o volcanes estrombolianos; edificios con bases circulares del orden de 500 a 1000 metros de diámetro y alturas en el rango de 200-500 metros.

- 3) **Coladas en bloques.** Si los dos casos anteriores son propios de lavas de composición basáltica, este tipo de estructuras aparece asociada a lavas de composición traquítica o fonolítica. Uno de los ejemplos más espectaculares de este tipo de superficies lávicas puede observarse en la carretera del Portillo de la Villa a la estación del Teleférico del Teide (Fig. 3.3), en la cual unas potentes coladas obsidiánicas de composición traquítica muestran toda su superficie atormentada y fragmentada en grandes bloques caóticos de varios metros cúbicos cada uno.



Figura 3.1; Lava cordada. El Charco Azul, Frontera, El Hierro
(Hernández LE, 2004).



Figura 3.2; Apilamiento de lavas “aa”, con superficie escoriácea (malpaís). Playa Echentive, Fuencaliente, La Palma (Hernández LE, 1996).



Figura 3.3; Coladas obsidiánicas en bloque. P. N de Las Cañadas del Teide, Tenerife (Santamarta JC, 2011).

Los depósitos piroclásticos se clasifican, en función de las condiciones en que la columna eruptiva interacciona con la atmósfera, el grado de explosividad y la composición del magma, en tres tipos.

- 1) **Depósitos plinianos.** Formados a partir de columnas eruptivas estables o columnas plinianas, en las cuales las partículas de pómez son eyectadas a elevada altitud y posteriormente arrastradas, dispersadas por el viento y depositadas posteriormente en el terreno en forma de lluvia piroclástica. En este caso se originan depósitos de lluvia piroclástica o “ash fall” (Fig. 3.4). En ellos los fragmentos de pómez están sueltos y el depósito en conjunto carece de toda solidez y no presenta ninguna consistencia, ni resistencia alguna a la aplicación de esfuerzos sobre el mismo, sin la ayuda de agentes compactantes.
- 2) **Depósitos de ignimbritas.** Formados a partir de columnas eruptivas gravitatoriamente inestables o vulcanianas. En este caso, la columna eruptiva sufre un colapso parcial o total de la misma, generándose una nube ardiente de elevada densidad de partículas con una masa interna en la que, las partículas de pómez y cenizas mezcladas de forma caótica, son mantenidas en suspensión por la masa de gases. Durante la formación de las ignimbritas, pueden producirse, debido a una elevada temperatura en el depósito, procesos de deformación y soldadura en los fragmentos de pómez y del resto de partículas de origen magmático en el depósito, en cuyo caso se forman unas texturas en flamas, por su aspecto de llamas, propias de las ignimbritas soldadas. En consecuencia y como resumen, existen dos tipos de ignimbritas: a) ignimbritas no soldadas y b) ignimbritas soldadas o ignimbritas con textura eutaxítica (Fig. 3.5).
- 3) **Conos de cinder.** Muy abundantes en la geografía insular, se forman en erupciones estrombolianas y de forma similar a los de lluvia piroclástica; los fragmentos de magma son expulsados por el volcán en pequeñas explosiones y depositados muy cerca del cráter, de manera que se va acumulando a su alrededor una montaña de piroclastos que constituye por sí misma el volcán estromboliano o cono de cinder (Fig. 3.6). Al contrario que los piroclastos de las erupciones plinianas (de composición traquítica o fonolítica), éstos tienen composición basáltica y son conocidos en la terminología local como picón, jable o zahorra.

Todos estos materiales configuran un paisaje en el que las variaciones geológicas se reflejan a su vez en espectaculares contrastes paisajísticos. De manera muy generalizada destacan a vista de pájaro los paisajes de los macizos antiguos con relieve dominado por agudas crestas, divisorias afiladas, altas pendientes topográficas y ba-



Figura 3.4; Pómez de caída (“Ash fall”). Arico, Tenerife. (Hernández LE, 2003).



Figura 3.5; Ignimbrita soldada. Barranco del Medio Almod, Mogán, Gran Canaria. (Hernández LE, 2003).

rancos muy profundos, en contraste con los relieves más suavizados y de pendiente topográfica menos acusada que caracterizan a los macizos recientes (Fig. 3.7).

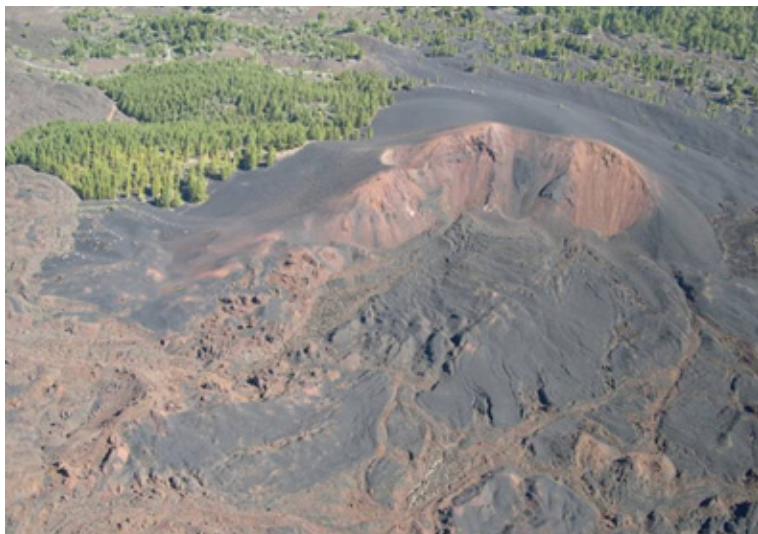


Figura 3.6; Cono de piroclastos basálticos. Vista aérea del Volcán Chinyero, El Tanque - Santiago del Teide, Tenerife. (Garrido J, 2006).



Figura 3.7; Vista general del Noereste de Tenerife, en la que se aprecia el contraste entre el relieve abrupto del Macizo de Anaga (al fondo) y la topografía suavizada de Santa Cruz de Tenerife, La Laguna y La Esperanza. (Garrido J, 2006).

5. Clasificación de los materiales volcánicos de Canarias

El objeto de esta clasificación es facilitar a los técnicos y profesionales, con conocimientos limitados de geología, un medio para asignar un nombre a una roca, que tal vez no sea estrictamente correcto desde el punto de vista geológico, pero que permitiría situar a la misma dentro de una familia, y por tanto, ayudar a la identificación de problemas ingenieriles asociados con esa familia (Hernández, L. E. et al, 2011). Los nombres se han seleccionado principalmente entre aquellos que se utilizan en los libros no especializados en geología, y no se utilizan en sentido estricto, sino en término general para un amplio grupo de tipos de rocas (litotipos) relacionadas.

Los materiales rocosos altamente cohesivos se han clasificado en litotipos en función de los siguientes criterios (Rodríguez Losada, J. A. et al, 2009):

- 1) **Criterio litológico.** Basado en la composición químico-mineralógica de las rocas. En el Archipiélago Canario la litología dominante es mayoritariamente basáltica en todas las islas. A esto hay que añadir la extraordinaria complejidad geológica de las islas centrales (Gran Canaria y Tenerife) donde además de los materiales mencionados, afloran en una proporción muy importante rocas de composición intermedia (traquibasaltos) y sálicas (traquitas y fonolitas). Así mismo, es también muy destacable en estas dos islas la existencia de ignimbritas de composición fonolítica y con texturas muy variadas.
- 2) **Criterio textural.** Basado en las características de los minerales que constituyen las rocas volcánicas, así como de sus tamaños. Los tipos de texturas presentes en los distintos tipos litológicos son los que se definen a continuación:
 - a) **AFANÍTICA:** Sin cristales visibles. Presente en materiales basálticos, traquibasálticos, traquíticos y fonolíticos.
 - b) **PORFÍDICA:** Con cristales visibles rodeados por una matriz micro o criptocrystalina. Presente también en materiales basálticos y en los que los cristales visibles, pueden ser de augita y olivino (basaltos olivínico-piroxénicos) o de plagioclasa (basaltos plagioclásicos). También se puede encontrar olivino como mineral principal observable (picritas), si bien a efectos de definir litotipos, éstas pueden quedar integradas en el grupo de los olivínico-piroxénicos.

- c) **TRAQUÍTICA:** Propia de los términos traquíticos y fonolíticos, así llamada porque es el tipo de textura dominante en la mayoría de rocas de composición traquítica. Se caracteriza por la presencia de cristales visibles, fundamentalmente de feldespato sódico-potásico, piroxeno o anfíboles, rodeados por una matriz de pequeños cristales orientados o dispuestos al azar (afieltrados), de similar naturaleza.

- 3) **Vesicularidad.** Basado en la presencia o ausencia de vacuolas en el material rocoso. Dichas vacuolas se corresponden con burbujas de gas contenidas en la lava y que durante su desarrollo y migración hacia la superficie de la colada, quedaron atrapadas tras completarse el proceso de solidificación.

Los materiales piroclásticos débilmente cementados, pueden aparecer completamente sueltos o bien con una cierta cohesión entre los fragmentos debido a procesos de soldadura débil. En este caso, los criterios utilizados para su división en litotipos son:

- 1) **Criterio litológico.** Basado en la composición químico-mineralógica de los piroclastos. Se han diferenciado dos grandes grupos, los basálticos, de tonalidades oscuras o rojizas y los sálicos, de tonalidades más claras.
- 2) **Tamaño de los piroclastos.** De mayor a menor tamaño, los piroclastos se clasifican en escorias, lapilli o cenizas en el caso de los basálticos o en pómez o cenizas en el caso de los sálicos.
- 3) **Estado de cementación.** Conduce a materiales piroclásticos con los fragmentos débilmente cohesionados o completamente sueltos.

A partir de dichos criterios se establece la siguiente clasificación de litotipos:

Tabla 3.2; Litotipos de las Islas Canarias.

ROCAS	BASALTOS (B)	OLIVÍNICO-PI-ROXÉNICOS (OP)	VACUOLARES (V)	B-OP-V
			MASIVOS (M)	B-OP-M
		PLAGIOCLÁSICOS (PL)	VACUOLARES (V)	B-PL-V
			MASIVOS (M)	B-PL-M
		AFANÍTICOS (AF)	VACUOLARES (V)	B-AF-V
			MASIVOS (M)	B-AF-M
		ESCORIÁCEOS (ES)		B-ES
	TRAQUIBASALTOS (TRQB)			TRQB
	TRAQUITAS (TRQ)			TRQ
	FONOLITAS (FON)			FON
	IGNIMBRITAS (IG)	SOLDADAS		IG-S
NO SOLDADAS		IG-NS		
PIROCLASTOS	PIROCLASTOS BASALTICOS	LAPILLI (LP)	SUELTO (S)	LPS
			CEMENTADO (T)	LPT
		ESCORIAS (ES)	SUELTO (S)	ESS
			CEMENTADO (T)	EST
		CENIZAS BASÁLTICAS (CB)	SUELTO (S)	CBS
			CEMENTADO (T)	CBT
	PIROCLASTOS SÁLICOS	PÓMEZ (PZ)	SUELTO (S)	PZS
			CEMENTADO (T)	PZT
		CENIZAS SÁLICAS (CS)	SUELTO (S)	CSS
			CEMENTADO (T)	CST

Bibliografía consultada y referencias

- ANGUITA, F., HERNAN, F. (1975). *A propagating fracture model versus a hot spot origin for the Canary islands*. Earth and Planetary Science Letters 27 (1): 11-19.
- ANGUITA, F., HERNAN, F. (2000). *The Canary Islands origin: a unifying model*. Journal of Volcanology and Geothermal Research 103 (1): 1-26.
- ARAÑA, V., HERNAN, F., ORTIZ, R. (1975). *Deep structure of Timanfaya Volcano and its implications on the Canarian Archipelago origin*. IUGG Meeting. Grenoble.
- HERNANDEZ, L. E., RODRÍGUEZ LOSADA, J.A., OLALLA, C. (2011). *Guía para la realización y la planificación de estudios geotécnicos para edificación en las Islas Canarias*. Consejería de Obras Públicas y Transportes. Gobierno de Canarias.
- HOERNLE, K.A.J., SCHMINCKE, H.U. (1993). *The Role of Partial Melting in the 15-Ma Geochemical Evolution of Gran Canaria: A Blob Model for the Canary Hotspot*. Journal of Petrology 34(3): 599-626.
- MORGAN, W.J. (1971). *Convection Plumes in the Lower Mantle*. Nature 230: 42-43.
- RODRÍGUEZ-LOSADA, J.A., HERNÁNDEZ-GUTIÉRREZ L.E., OLALLA, C., PERUCHO, A., SERRANO, A., EFF-DARWICH, A., (2009). *Geomechanical parameters of intact rocks and rock masses from the Canary Islands: Implications on their flank stability*. Journal of Volcanology and Geothermal Research 182 (2009) 67-75.
- WILSON, J.T. (1973). *Mantle plumes and plate motions*. Tectonophysics 19 (2). 149-164.



Hidrogeología y terrenos volcánicos

María del Carmen Cabrera Santana
Emilio Custodio Gimena

1. Introducción

La Hidrogeología o Hidrología Subterránea es la ciencia que estudia las aguas subterráneas. Estas constituyen un recurso hídrico tradicional, que es ampliamente utilizado en terrenos volcánicos, como es el caso de Canarias. El que un determinado territorio (volcánico o no) sea rico o pobre en recursos hídricos depende de una situación relativa entre las necesidades de una sociedad humana con un determinado grado de desarrollo económico y social, y los recursos de agua dulce. Estos recursos deben tener una calidad adecuada a su uso previsto y a un coste determinado, de forma que se puedan poner a disposición para su uso en un determinado contexto geográfico y teniendo en cuenta las infraestructuras existentes para su captación, transporte, almacenamiento, distribución y tratamiento. Las aguas subterráneas juegan también un papel fundamental en el mantenimiento de cursos superficiales y ecosistemas. En Canarias, el problema de escasez de recursos hídricos naturales ha sido un acicate para un reciente e importante desarrollo de otras técnicas de generación de recursos hídricos, así como la utilización de aguas regeneradas y la desalación. Sin embargo, las aguas subterráneas siguen constituyendo aproximadamente el 70% del total de recursos de agua utilizados en el Archipiélago.

El presente capítulo presenta las bases fundamentales del funcionamiento de las aguas subterráneas así como las especificidades de la hidrogeología de terrenos volcánicos. Existe gran cantidad de tratados sobre aspectos generales, destacando en castellano el de Custodio y Llamas (1976) y el elaborado por la Comisión Docente

del Curso Internacional de Hidrología Subterránea (2009). Los aspectos concretos en rocas volcánicas fueron tratados con gran amplitud durante el proyecto Canarias SPA-15 (1975), cuyas conclusiones se recogieron en Custodio (1978). Existen varios trabajos de síntesis posteriores (Custodio, 1989; 2007), además de trabajos concretos que han sido fruto de tesis doctorales desarrolladas en Canarias. Véase Gasparini et al. (1990), Cabrera y Custodio (2004), Herrera y Custodio (2003), Cruz et al. (2010) y Marrero (2010).

2. Conceptos básicos

2.1. El ciclo hidrológico

El agua en la Hidrosfera se encuentra en sus tres estados físicos: sólido, líquido y gaseoso. Es en estado líquido cuando tiene mayor interés para el hidrólogo ya que en esta forma está la lluvia, los ríos, los lagos y también las aguas subterráneas, que son el objeto de estudio de la hidrogeología.

El concepto de Ciclo Hidrológico es claro: a grandes rasgos, en la atmósfera el agua sufre un movimiento ascendente desde los océanos por evaporación y un movimiento descendente sobre los continentes por las precipitaciones (Figura 4.1), con el correspondiente transporte atmosférico y continental. La cantidad de agua de la corteza terrestre se ha mantenido prácticamente constante, al menos durante los últimos tiempos geológicos.

En el momento en que una parte del vapor de agua de la atmósfera se condensa y da origen a precipitaciones en forma de lluvia o nieve; no toda el agua llega a la superficie, sino que una parte es evaporada durante la caída y otra es retenida -intercepción- por la vegetación y también por diversas construcciones, como edificios o carreteras, de manera que vuelve de nuevo a la atmósfera por evaporación.

Del agua que alcanza la superficie del terreno (*precipitación*), una parte queda retenida en charcos (retención superficial) y es evaporada en su mayor parte (*evaporación*). Otra parte circula por la superficie y la parte epidérmica del terreno por efecto de la gravedad, constituyendo la *escorrentía superficial*, que acaba en torrentes, ríos, lagos o en el mar, de donde será evaporada de nuevo.

Una última parte del agua de lluvia es la que penetra en la superficie del terreno a través de los poros o grietas del mismo y se mueve hacia abajo por gravedad -*infil-*

tración-. Aún hay que tener en cuenta que parte de este agua de infiltración -tanto más cuanto más árido sea el clima- puede sufrir *evaporación* desde la zona no saturada o bien puede ser *transpirada* por las plantas desde el suelo edáfico. En la práctica, la suma de ambos fenómenos se denomina *evapotranspiración*. En terrenos vegetados domina la *transpiración*.

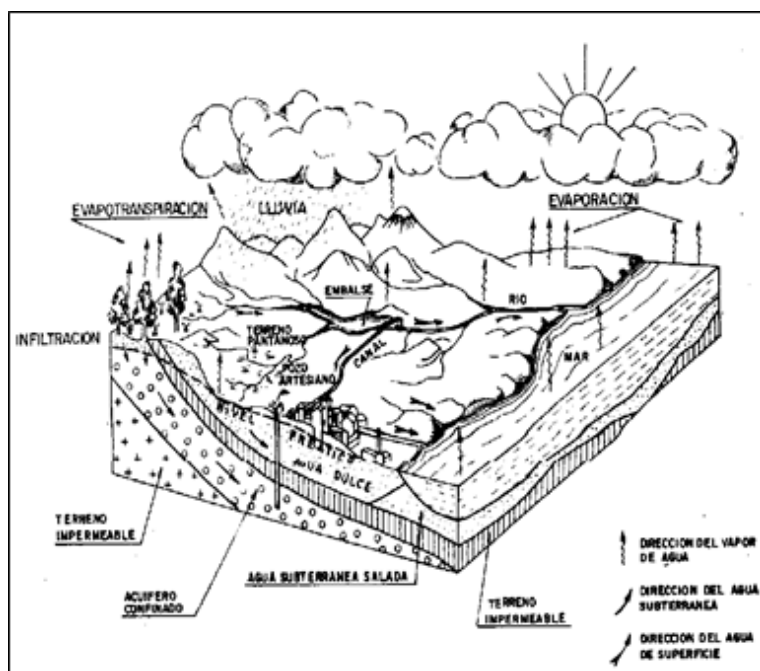


Figura 4.1; El ciclo hidrológico (Custodio y Llamas, 1976).

El resto del agua sigue descendiendo por gravedad hasta llegar a una zona en la que todos los poros del terreno contienen agua (zona saturada), constituyendo la *recarga*, y pasa a formar parte del agua subterránea, la cual se mueve hacia los lugares en que descarga a la superficie (*escorrentía subterránea*), en manantiales (nacientes), ríos, lagos, humedales y el mar.

La cuantificación de estos términos permite establecer el BALANCE HÍDRICO. En valor medio, el balance es:

$$\text{PRECIPITACIÓN} - \text{EVAPORACIÓN} - \text{ESCORRENTÍA SUPERFICIAL} - \text{EVAPOTRANSPIRACIÓN} = \text{RECARGA}$$

Sin embargo, puede haber variaciones estacionales y de un año a otro, que se compensan al variar la cantidad de agua almacenada en el terreno.

2.2. Aguas subterráneas

Todas las formaciones geológicas contienen agua en mayor o menor medida. El agua está en los poros, grietas y fisuras del terreno. Se llama *porosidad* (volumétrica) a la relación entre el volumen de esos poros y fisuras y el volumen de terreno considerado. Estos poros pueden estar totalmente llenos de agua –*medio saturado*– o parcialmente, coexistiendo con aire –*medio no saturado*–, en cuyo caso el contenido (volumétrico) de agua, o humedad es menor que la porosidad.

En la *zona no saturada*, la presión del agua es menor que la atmosférica a causa de los esfuerzos superficiales y conviven huecos rellenos de agua y de aire. En la *zona saturada*, todos los huecos están rellenos por agua y a presión mayor que la atmosférica. La superficie que separa la zona no saturada de la saturada se denomina *superficie freática* y en ella la presión es igual a la atmosférica.

Cuando se deja que el agua de un medio saturado se vacíe por gravedad, sólo sale una parte del agua contenida, ya que el resto queda retenido por esfuerzos capilares. Así se habla de *porosidad drenable* (o eficaz, aunque este término se usa con muchos significados y es confuso) a la fracción de agua que se drena, y lo que queda es la *porosidad de retención*.

El *potencial hidráulico* del agua en un punto del terreno se puede expresar como la suma de la altura de presión (longitud de la columna de agua que equilibra esa presión) más la elevación sobre una referencia (suele elegirse el nivel medio del mar). El agua se mueve en el terreno desde las partes de mayor potencial a las de menor potencial. En el medio saturado la altura que mide el potencial hidráulico se llama *nivel piezométrico (h)*. Así:

$$h = P/\gamma + z$$

En la que P es la presión del agua por encima de la presión atmosférica, γ su peso específico y z la elevación sobre la referencia. En la superficie freática, como $P=0$, es $h=z$. En un lugar a cota z_0 donde el nivel de agua en una perforación está a profundidad d, es $h=z_0-d$. Las superficies (líneas cuando se representan en un plano o

sección) que unen los puntos de igual nivel piezométrico son las *isopiezas* y la diferencia entre ellas dividida por su separación es el *gradiente hidráulico*, *i*.

Tabla 4.1; Designación de las formaciones geológicas según su capacidad de contener y transmitir agua.

	AGUA	
	CONTIENE	TRANSMITE
Acuífero	Si	Si, bien
Acuitardo	Si	Poco
Acuicludo	Si	No
Acuifugo	No	No

Según la capacidad de almacenar agua (función de la porosidad) y de la facilidad para que se mueva a su través, las formaciones geológicas se suelen clasificar en *acuíferos*, *acuitardos*, *acuicludos* y *acuifugos*, como indica la Tabla 4.1.

Se denomina *acuífero* (del latín aqua=agua y fero=llevar) a aquella formación geológica que permite la circulación del agua por sus poros y grietas hacia otras partes del territorio y hacia las descargas naturales, y que permita que el hombre pueda aprovecharla en cantidades económicamente apreciables para subvenir a sus necesidades. La relatividad de esta definición es fácilmente comprensible teniendo en cuenta que un acuífero es bueno o malo dependiendo de si es suficiente o no para satisfacer las necesidades, o en comparación con otras formaciones del lugar cuando éstas son menos adecuadas. Un *sistema acuífero* está constituido por una sucesión en la vertical y en el espacio de acuíferos y acuitardos (Figura 4.2).

Los acuitardos si bien movilizan poca agua por unidad de sección y no permiten producciones interesantes, pueden intercambiar grandes cantidades de agua con los acuíferos que tengan encima o debajo ya que las superficies de contacto pueden ser muy extensas.

La entrada de agua al acuífero se produce en la *zona de recarga*. Puede proceder de la lluvia, la escorrentía superficial, aguas superficiales, fugas de diversos sistemas, excedentes de riego o desde otros acuíferos o acuitardos. La salida de agua del acuífero se produce en la *zona de descarga*, y puede ser hacia el mar, lagos, humedales, cursos de agua superficial, captaciones artificiales por medio de pozos, galerías y drenes, o hacia otros acuíferos.

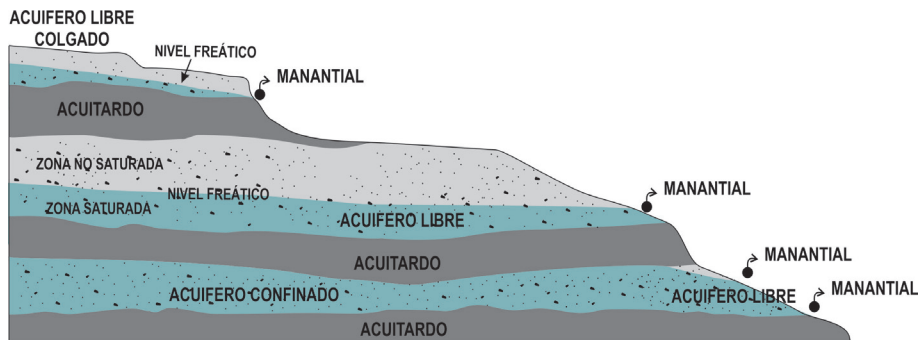


Figura 4.2; Sistema acuífero conformado por una sucesión de acuíferos y acuitardos en profundidad.

Se denomina *acuífero libre, no confinado o freático* a aquel en el que existe una superficie freática que está en contacto directo con la atmósfera del terreno no saturado.

En los *acuíferos cautivos, confinados o a presión*, el agua en el techo de los mismos está a una presión superior a la atmosférica. Por ello, cuando se atraviesa el techo del acuífero durante una perforación, el agua asciende por la misma. La *superficie piezométrica* se define en este caso como la superficie virtual que une todos los puntos a que llegaría el agua si se hiciesen infinitas perforaciones referidas a un mismo nivel de referencia. Esta superficie piezométrica puede quedar en ocasiones por encima del nivel del terreno. En ese caso, al efectuar una perforación que penetre el acuífero, el agua mana al exterior y se obtiene un *pozo surgente*. Lo mismo sucede si en el techo confinante existe una grieta o discontinuidad, dando lugar a un manantial (Figura 4.3).

Se llama *acuífero colgado* (o suspendido) a aquel que tiene medio no saturado bajo el nivel de baja permeabilidad que lo soporta. Parte del agua de recarga que recibe la descarga en manantiales colgados y otra parte la transfiere a través del acuitardo de base al acuífero libre inferior.

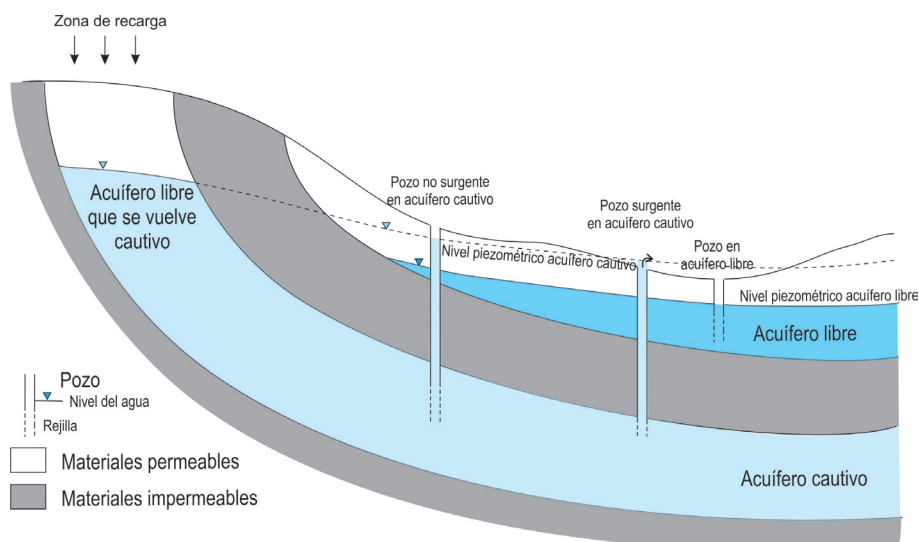


Figura 4.3; Tipos de acuíferos: Acuífero cautivo, confinado o a presión y Acuífero libre, no confinado o freático. En los pozos ranurados en el acuífero el agua sube hasta el nivel piezométrico del mismo, mientras que el agua en el acuífero libre se queda en el nivel freático.

2.3. El movimiento de las aguas subterráneas

Las aguas subterráneas se mueven por el subsuelo dependiendo de la distribución de las zonas de recarga y descarga, que condicionan los gradientes piezométricos, y de las características del terreno.

La *Ley de Darcy* cuantifica el movimiento de las aguas subterráneas. Establece la relación entre el caudal por unidad de sección, q , y el gradiente piezométrico, i , mediante un coeficiente de proporcionalidad, k , que se denomina *conductividad hidráulica*, y más comúnmente, *permeabilidad*.

$$q = -k \cdot i$$

Si L =longitud y T =tiempo, q y k tienen dimensiones L/T ya que i es adimensional. k se suele expresar en la práctica en $m/día$. Para el agua la permeabilidad depende principalmente del tipo de terreno.

Puede variar entre 10^{-8} m/día y más de 1000 m/día, de modo que es una de las magnitudes físicas con mayor rango de variación. Para un acuífero k puede variar entre 0.1 y 100 m/día. En un medio granular k viene determinada por el tamaño y distribución de los granos y en un medio fracturado de su abertura y grado de fracturación. No hay una relación unívoca con la porosidad.

La *Transmisividad* (T) se define como el producto de la permeabilidad (k) por el espesor del acuífero, con dimensiones L^2/T y se suele expresar en m²/día. La transmisividad tiene en cuenta la geometría de la formación acuífera.

Se denomina *coeficiente de almacenamiento* (S) a la variación de agua contenida por unidad de volumen cuando el nivel piezométrico varía en una unidad. Para un acuífero libre es la porosidad drenable y puede variar entre 0,1 y 0,25. Para un acuífero cautivo es un valor muy pequeño que depende de la compresibilidad del medio y de la elasticidad del agua (típicamente entre 10^{-3} y 10^{-5}).

El valor T/S , o *difusividad hidráulica*, mide la celeridad con que se transmiten las perturbaciones por un acuífero; es lenta en un acuífero libre y muy rápida en un acuífero cautivo.

En el movimiento de las aguas subterráneas por el acuífero se ha de cumplir la *Ley de la continuidad* (conservación de la masa de agua), que establece que en un determinado volumen de roca, la cantidad de agua que entra menos la que sale es igual a la variación de almacenamiento. Se resuelve de forma analítica o numérica.

2.4. Principios de hidrogeoquímica

La molécula de agua (H_2O) es polar y asimétrica, por lo que presenta propiedades especiales, entre las que destaca que sea un disolvente universal, especialmente de las sustancias iónicas. Las sustancias disueltas en el agua pueden ser iones, moléculas (inorgánicas u orgánicas) o gases (como N_2 , O_2 , CO_2). Los iones pueden ser simples (como Na^+ , Cl^-), complejos (como HCO_3^- , SO_4^{2-}) o pares iónicos (como $Ca(OH)^+$, $MgHCO_3^+$). Las concentraciones se miden en diversas unidades, siendo las más utilizadas en hidrogeología los miligramos de soluto por volumen de disolución (mg/L) y los miliequivalentes químicos por volumen de disolución (meq/L). Se entiende por miliequivalente el peso de sustancia (en mg) dividido entre el peso equivalente de la misma. El peso equivalente es el peso molecular dividido por la carga iónica.

Las determinaciones que pueden llevarse a cabo en un análisis químico de agua se muestran en la tabla 4.2 .

Dado que en un análisis químico de agua la suma de cationes debe ser igual a la de aniones (expresados ambos en meq/L), la diferencia en la realidad permite determinar el posible error analítico del análisis realizado.

Tabla 4.2; Propiedades y contenido de un agua subterránea

Propiedades	pH = $-\log \langle H^+ \rangle$
	Conductividad eléctrica ($\mu S/cm$)
	Residuo seco
	Dureza = $rCa+rMg$
Mayoritarios	aniones HCO_3^- , (CO_3^{2-}) , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , (HS^-)
	cationes Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , (NH_4^+)
	no iónicas H_2CO_3 , CO_2 , $Si(OH)_4$
Minoritarios	F^- , Fe^{2+} , Mn^{2+} , As , UO_2^{2+} , Cu^{2+}
Traza	metales pesados, sustancias orgánicas...
Nanocomponentes	contaminantes emergentes

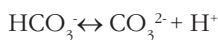
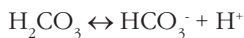
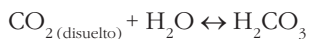
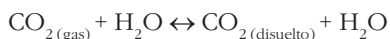
En el agua con sustancias disueltas, *la fuerza iónica* (μ) expresa el contenido iónico de una solución y depende de las concentraciones de los iones presentes y de la carga de los mismos. En el estudio de las reacciones químicas, la *actividad* es la concentración efectiva a la que está un ión; depende de la molalidad (número de moles por litro) y de un coeficiente de actividad que está relacionado con la fuerza iónica. Para soluciones muy diluidas la actividad coincide aproximadamente con la molalidad.

El pH es un valor de gran importancia que expresa la concentración de ión H^+ como $pH = -\log \langle H^+ \rangle$ en que $\langle H^+ \rangle$ es la actividad (concentración efectiva) de H^+ expresado en moles/L.

Cuando se produce la disolución de minerales o sustancias en contacto con el agua, tienen lugar reacciones químicas que transforman los reactivos (agua y mineral) en los productos de la reacción (iones disueltos y/o minerales secundarios). Estas reacciones pueden ser reversibles (iguales velocidades en los dos sentidos) o irreversibles (progresan en un sentido). En el primer caso, se define una *constante de*

equilibrio (K) entre las actividades de los productos y reactivos, que depende de la temperatura y la presión, y que está tabulada para cada reacción. La disolución de minerales por parte del agua puede ser congruente cuando se disuelve todo el mineral o incongruente cuando queda una parte sólida como resultado de la reacción.

En aguas naturales, los equilibrios carbónicos dan lugar a reacciones tampón que se oponen a los cambios de pH, haciéndolo menos variable. Las reacciones que rigen este fenómeno son las siguientes:



Si además hay calcita presente:



Todas estas reacciones dependen de la temperatura y hacen que el pH en las aguas naturales esté normalmente entre 6,5 y 8.

Si se considera la disolución de un mineral en agua, la constante de equilibrio de la reacción se convierte en un *producto de solubilidad*, *PS*, característico para cada especie química, y por lo tanto para cada mineral. En el caso de una determinada sustancia y agua pura, a una cierta temperatura, la *solubilidad* es el peso que se disuelve por litro de agua, cuyo valor está estrechamente relacionado con el producto de solubilidad.

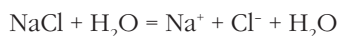
Unas pocas sustancias son fácilmente solubles (como la halita, NaCl) y otras moderadamente solubles (como el yeso, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), pero la mayoría son muy poco solubles, incluyendo la calcita, dolomita y silicatos naturales. Cuando se disuelven es porque uno de los iones resultantes es muy intensamente transformado en otro, en general por reacción con H^+ del agua (que se mide por el pH). Así al disolver calcita como Ca^{2+} y CO_3^{2-} , el $\text{CO}_3^{2-} + \text{H}^+$ pasa a HCO_3^- y puede seguir la disolución, con lo que el agua incorpora Ca^{2+} y HCO_3^- , con sólo concentraciones mínimas de CO_3^{2-} que establece el equilibrio a través del producto de solubilidad. El H^+ lo proporciona, entre otros, la disolución del CO_2 , según se ha indicado anteriormente.

En un agua real el contenido iónico efectivo, que viene dado por las actividades iónicas para los iones que intervienen en la disociación iónica de una cierta especie mineral, permite calcular el *producto iónico*, *PI*. Según que el PI sea menor, igual o mayor que el PS respecto a un cierto mineral presente, el agua está subsaturada (se puede disolver), está saturada, o está sobresaturada (se puede precipitar), respectivamente. Así, en un agua natural saturada respecto a la calcita, la pérdida de CO_2 a la atmósfera aumenta la concentración de CO_3^{2-} y se vuelve sobresaturada y puede dar precipitados (incrustaciones), pero el aporte de CO_2 profundo tiene el efecto contrario si hay calcita presente. Si además se disuelve yeso, éste aporta Ca^{2+} , que hace aumentar su concentración, y el agua se sobresatura respecto a la calcita; es el llamado *efecto de ión común*.

Otro tipo de reacciones de interés en la disolución de sales por el agua son las *reacciones redox*. Se trata de aquellas que producen cambios en la valencia de los iones por transferencia de electrones (oxidación si los pierden y reducción si los ganan). Pueden ser reversibles o irreversibles y dependen de las condiciones de pH, presión, temperatura, etc. El potencial redox (Eh) mide la tendencia a la oxidación-reducción. Un ejemplo de este proceso sería el paso de Fe^{2+} a Fe^{3+} por oxidación; el Fe^{2+} es soluble pero no el Fe^{3+} a pH normales y se precipita.

Las *reacciones de intercambio iónico* consisten en el reemplazamiento de ciertos iones retenidos por fuerzas débiles por otros que vengan disueltos en el agua. Existe un equilibrio dinámico entre los iones adsorbidos y los disueltos en el agua. Los minerales que tienen una mayor capacidad de intercambio iónico son los filosilicatos (minerales de la arcilla). Este proceso se produce fundamentalmente con cationes. El intercambio entre el Ca^{2+} y Na^+ caracteriza los fenómenos de salinización y lavado de acuíferos.

Las relaciones *agua-roca* están determinadas por el tipo de reacciones que tienen lugar entre los minerales presentes y el agua. Las reacciones de *disolución simple* son las que tienen lugar entre minerales con un producto de solubilidad alto y el agua, por ejemplo la halita:

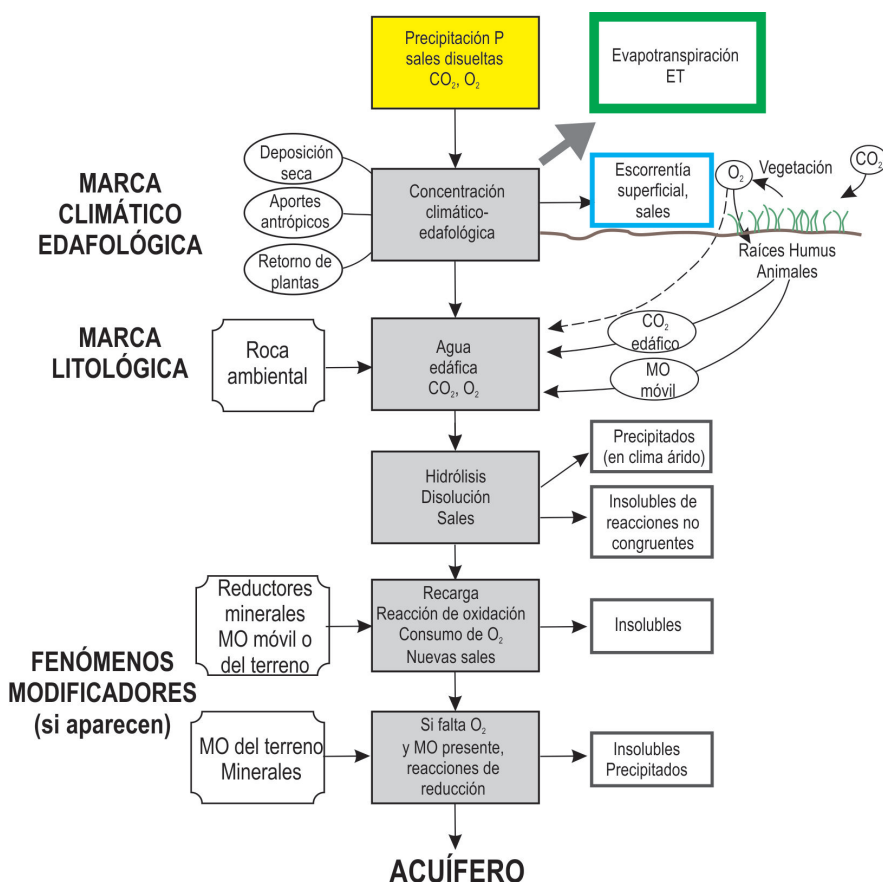


Sin embargo, la mayoría de los minerales (los silicatos) sufren hidrólisis, según reacciones con el siguiente patrón:



Estas reacciones están controladas por el pH de la solución y, en última instancia, por la presencia de CO_2 natural según las reacciones de los equilibrios carbónicos expuestas anteriormente.

Por último, existen minerales que se oxidan en presencia del O_2 atmosférico (disuelto en el agua) o se reducen por efecto de materia orgánica. Como ejemplo, pueden citarse la pirita (FeS_2) que da lugar a sulfatos, el metano (CH_4) que da lugar a CO_2 en condiciones oxidantes, el NO_3^- que se reduce a N_2 (a veces a NH_4^+), los óxidos de hierro que se reducen a Fe^{2+} o el SO_4^{2-} que se reduce a HS^- .



La figura 4.4 muestra un esquema de los procesos químicos que sufre el agua en su camino hacia el acuífero. Así, el agua resultante en el acuífero depende todos los factores que intervienen: el agua de recarga, el aporte de sales atmosféricas, la evapoconcentración según el clima y el suelo-vegetación, la generación de CO_2 a partir de la actividad biológica del suelo, la oxidación de materia orgánica y los aportes profundos, la capacidad de meteorizarse de la roca, la existencia de fenómenos modificadores (precipitaciones/disoluciones, cambio iónico o reacciones redox), la existencia de sales en el terreno y el tiempo de renovación del agua.

2.5. Los isótopos ambientales en hidrología

Los isótopos de un elemento son aquellos átomos que tienen el mismo número atómico pero diferente peso atómico, debido a que tienen diferente número de neutrones en el núcleo. Los isótopos estables son aquellos que permanecen en el tiempo, mientras que los radioactivos se transforman en otro elemento emitiendo partículas del núcleo para estabilizarse. Esta transformación se realiza estadísticamente. El tiempo que tarda una cantidad de isótopos de un elemento en reducirse a la mitad es el *periodo radioactivo*, T . La radiactividad es la emisión de energía que se produce cuando unos isótopos se transforman en otros emitiendo radiaciones y/o partículas.

Los isótopos de un elemento presentan el mismo comportamiento químico pero un comportamiento físico y físico-químico ligeramente diferente que se manifiesta en pequeñas variaciones de su difusividad, velocidad de reacción y energía de los enlaces químicos. En general, las moléculas que contienen isótopos pesados son algo más lentas en los procesos que las que contienen isótopos ligeros. Esto se traduce en pequeñas variaciones y cambios de las relaciones entre la concentración en isótopos pesados y ligeros (ver el capítulo 4). El proceso se llama *fraccionamiento isotópico*. Así, el vapor de agua es más *ligero* que el agua de que procede, que es más pesada, o el HCO_3^- del agua es más *pesado* que el CO_2 que lo ha generado, o el sulfato de oxidación de la piritita del terreno tiene un S más ligero, mientras que el S reducido residual en el terreno es más pesado.

En hidrología se utilizan los isótopos de los elementos que forman parte de la molécula de agua y de algunas sustancias disueltas (tabla 4.3).

Los isótopos radioactivos se utilizan para evaluar la edad del agua, considerada como el tiempo transcurrido desde que ha entrado por la superficie del terreno

Tabla 4.3; Relación de los isótopos más utilizados en hidrogeología.

^{16}O (abundante)	^{17}O (muy raro)	^{18}O (raro)
^1H (protio, abundante)	^2H (deuterio, D; raro)	^3H (tritio, radioactivo; T= 12,54 años)
^{12}C (abundante)	^{13}C (raro)	^{14}C (radioactivo; T= 5730 años)
^{32}S (abundante)	^{34}S (raro)	
^{14}N (abundante)	^{15}N (raro)	
^{35}Cl (abundante)	^{37}Cl (abundante)	^{36}Cl (radioactivo; T= 301000 años)

hasta que es muestreada en el acuífero. Se hace midiendo cuánto isótopo radioactivo queda respecto al inicial después de considerar las transformaciones durante el recorrido.

En otros casos, hay especies isotópicas que dependen de la roca y apenas cambian en los procesos que llevan a su disolución. En este caso es un indicador del origen de la sustancia disuelta. Tal sucede por ejemplo con el Sr a partir de la relación isotópica $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. Se trata de un trazador natural. También el agua de recarga mantiene su composición isotópica en el terreno y permite conocer su origen (lugar y altitud).

3. Aspectos hidrogeológicos del volcanismo

El volcanismo ha sido y es un importante agente geológico en la construcción de formaciones rocosas, responsable de la formación de extensas áreas en la Tierra y especialmente de las islas oceánicas. Su formación tiene características diferenciales respecto a otras rocas y puede tener una gran complejidad al combinarse muy diversos materiales con variadas formas de acumulación y de destrucción, todo ello en tiempos relativamente cortos respecto a otros mecanismos de formación de materiales geológicos. También están sujetos a procesos geoquímicos singulares.

Los materiales emitidos durante los fenómenos volcánicos presentan una gran diversidad: desde materiales sólidos (piroclastos) de muy diverso tamaño y forma de emisión, hasta líquidos (lavas) y gaseosos. Además, el magma que da origen a estos materiales se enfría en profundidad dando lugar a complejos intrusivos que pueden también llegar a aflorar por mecanismos de levantamiento y erosión. La composición química puede ser muy variable, dependiendo del marco geodinámico

(borde de placa compresivo, borde de placa distensivo o vulcanismo intraplaca) y de la composición del magma que los produce, que a su vez está condicionado por su situación. También las estructuras geológicas son muy variadas. Así, los fenómenos volcánicos están estrechamente ligados al desencadenamiento de fenómenos catastróficos, como deslizamientos gigantes o apertura de calderas que condicionan el relieve y la configuración de las formaciones geológicas en profundidad. Por todo ello, estos materiales presentan diferencias notables según se consideren a gran escala o en detalle, y según la edad que tengan, con un comportamiento hidrogeológico diferente en cada caso.

4. La hidrogeología de los terrenos volcánicos

La naturaleza y estructura de las rocas volcánicas configura un territorio en el que existe un apilamiento de materiales que van desde los muy compactos hasta los que presentan una porosidad que puede superar el 50%, desde los que tienen las cavidades totalmente conectadas hasta aquellos que, aún pudiendo ser muy porosos, tienen sus poros aislados unos de otros, desde los que no presentan grietas hasta aquellos que poseen un elevado índice de cavidades debidas a la fisuración. Así, los pozos en rocas volcánicas a veces pueden dar caudales espectaculares con pequeños descensos del nivel, pero en la misma formación y a escasa distancia pueden ser prácticamente estériles (Custodio, 1978; Custodio y Llamas, 1976).

Como condicionantes de la casuística hidrogeológica posterior debe tenerse en cuenta (La Moneda, 2001, doc. interno):

- Que son frecuentes los procesos de reajuste en materiales jóvenes mediante deslizamientos que pueden ser de cierta entidad.
- Que una vez depositados los materiales lávicos sobre la superficie sufren un proceso de enfriamiento relativamente rápido originándose fracturas de retracción (diaclasas) que originan discontinuidades en los cuerpos rocosos.
- Que en las coladas de flujos piroclásticos (ignimbritas, tobas soldadas, etc.) se suele producir una emisión o segregación de gases y vapor de agua, los que pueden dar lugar a la formación de depósitos de minerales secundarios que colmatan en un grado muy variable las fisuras iniciales.

- Que además de las diaclasas (fisuras que se producen en lavas y depósitos piroclásticos soldados por pérdida de volumen durante el enfriamiento) en los materiales volcánicos existen otros huecos: vacíos generados por las condiciones de deposición del material (tubos volcánicos, huecos de las escorias de techo y base de colada, etc.) que suelen estar conectados localmente, y huecos no conectados correspondientes a las vacuolas que ocupan los gases volcánicos en la masa lávica, que no están conectados.
- Que las características estructurales y texturales iniciales de los materiales volcánicos pueden ser alteradas por procesos posteriores a su emplazamiento. Existe toda una serie de procesos que producen alteraciones, colmataciones y compactaciones que disminuyen los huecos y su conexión y, paralelamente, también existen procesos de lixiviado, descompresión y fracturación que aumentan los huecos y discontinuidades.

Los procesos de alteración y erosión de los materiales volcánicos son relativamente rápidos como resultado de su metaestabilidad petroquímica y su diaclasamiento, por lo que su modelación erosiva y la generación de sedimentos con estos materiales es muy rápida cuando se dan las condiciones climáticas adecuadas.

4.1. Estructura interna de las coladas

Desde el punto de vista hidrogeológico tiene interés la estructura vertical de las coladas de lava, ya que influye notablemente en el flujo del agua a su través. De forma general, se puede distinguir una zona brechoide de base, formada por el fro-tamiento de la lava con el terreno. Es una zona grosera, heterométrica, escoriácea, con bloques y pedazos de lava sólida hundidos y fragmentos del terreno, bajo la cual pueden haberse producido efectos térmicos en los materiales preexistentes. Esta zona brechoide va desapareciendo hacia arriba para dar lugar a un material compacto, cuya porosidad es reducida, dependiendo de la facilidad de escape del gas ocluido y disuelto, y que a veces puede llegar a ser cristalina en el centro de coladas muy espesas, debido a ese lento enfriamiento. Ya cerca de la superficie, y dependiendo del tipo de lava, puede formarse una zona muy escoriácea y vesicular debido al escape de los gases, con porosidades totales de hasta el 60% o más, aunque no siempre los poros están conectados.

En el proceso de enfriamiento, tanto más cuanto más lento sea y más alta la temperatura inicial, la lava se contrae, dando lugar a la aparición de grietas de retracción

verticales (disyunción columnar), bien desarrolladas en la parte central de las coladas. También pueden existir diaclasas horizontales, paralelas al flujo de la lava, principalmente a un tercio de la base en coladas potentes.

Como rasgos secundarios se puede citar la existencia de pequeños tubos en la base de las coladas, originados en las deformaciones transversales de la lava en su reptación, y a la existencia de pequeñas cavidades tubulares verticales originadas por el escape localizado de gases.

Si entre erupción y erupción ha transcurrido suficiente tiempo, se puede haber formado un suelo (incipiente o desarrollado), más o menos arcilloso, que es recocado al ser cubierto por la colada caliente, dando lugar a una capa rojiza (almagre), cuyo espesor y desarrollo es variable según la topografía y el clima, adquiriendo gran importancia sobre niveles de piroclastos finos. Sin embargo, no siempre estos almagres son paleosuelos recocidos, sino que son las capas superiores de niveles piroclásticos poco alterados que han estado sometidos primeramente al efecto de los gases húmedos y calientes que se desprendieron de ellos mismos durante su emplazamiento y al efecto térmico de la colada que los recubre.

Con el transcurso del tiempo, las cavidades de las coladas volcánicas tienden a cerrarse, las mayores por colapso y derrumbamiento y las menores por relleno químico a partir de fluidos circulantes, y las diaclasas tienden a colmatarse. Por ello, la edad de las formaciones tiene un efecto importante en su comportamiento hidrogeológico.

4.2. Intercalaciones y discontinuidades en las acumulaciones de materiales volcánicos

El movimiento del agua subterránea dentro de los materiales volcánicos puede estar muy influido por accidentes menores dentro de los mismos, tales como intercalaciones y diques. Una formación volcánica extensa suele estar formada por la acumulación de productos volcánicos de diferentes erupciones. Unas veces se trata de coladas de lava o de ignimbritas, directamente unas sobre otras, y otras veces de una alternancia de piroclastos diversos y coladas lávicas.

Los almagres suelen tener desde unos pocos dm de espesor hasta algo más de 1 m, localmente hasta 2 ó 3 m si se trata de un paleosuelo, a veces bastante continuo. En general, se trata de niveles muy poco permeables, sobre los que a veces aparecen

pequeños manantiales colgados, en especial en lugares topográficamente bajos. La coacción los ha endurecido y por ello pueden presentar grietas de retracción prismáticas, además de las asociadas a los diques que los atraviesan, que pueden facilitar que el agua llegue a circular verticalmente a su través.

En los períodos de calma volcánica pueden haberse depositado diversos sedimentos detríticos (conglomerados, derrubios de pendiente, sedimentos marinos...), que quedan después intercalados en la serie volcánica, dando lugar a zonas localizadas que pueden tener una importante permeabilidad. Estos depósitos intraformacionales suelen tener interés hidrogeológico en caso de que se encuentren en la zona saturada.

Los diques son las discontinuidades verticales o inclinadas más importantes y frecuentes. Constituyen los conductos de alimentación de las erupciones volcánicas. Por tanto las rocas que los conforman son subvolcánicas y suelen presentar una textura más compacta que las que los contienen (rocas de caja). En una serie volcánica su número es mayor en la base que en el techo. En ocasiones son tan abundantes que unos grupos se inyectan dentro de otros. Su frecuencia es mayor en las formaciones antiguas que en las modernas, pudiendo no existir prácticamente en las recientes. La densidad de diques decrece rápidamente al alejarse de las áreas de emisión, de modo que pueden estar ausentes en acumulaciones de coladas de lava a cierta distancia de las mismas.

Internamente los diques muestran contactos afaníticos (de grano muy fino) con las paredes encajantes si sus bordes han sido enfriados con rapidez. Su interior puede llegar a ser groseramente cristalino si el enfriamiento ha sido muy lento en zonas profundas. En ocasiones son muy densos y compactos, pero otras veces presentan grietas de retracción claramente visibles, formando planos normales a las paredes. Por ello es difícil saber a priori su papel en lo que respecta a la circulación del agua, ya que unas veces son más impermeables que la roca de caja y otras son caminos preferenciales de flujo. Además, las deformaciones y alteraciones posteriores a su inyección pueden jugar un papel dominante.

4.3. Flujo del agua subterránea en terrenos volcánicos

Las características ya descritas configuran un conjunto sumamente heterogéneo y anisótropo a pequeña escala, condicionando claramente el flujo del agua subterránea (Figura 4.5). La heterogeneidad disminuye según aumenta el tamaño de la

muestra a observar: El volumen necesario para alcanzar un cierto grado de quasi-homogeneidad depende mucho de la formación y de sus características, entre métrico a hectométrico. El conjunto es en general anisótropo, con la permeabilidad vertical notablemente menor que la horizontal.

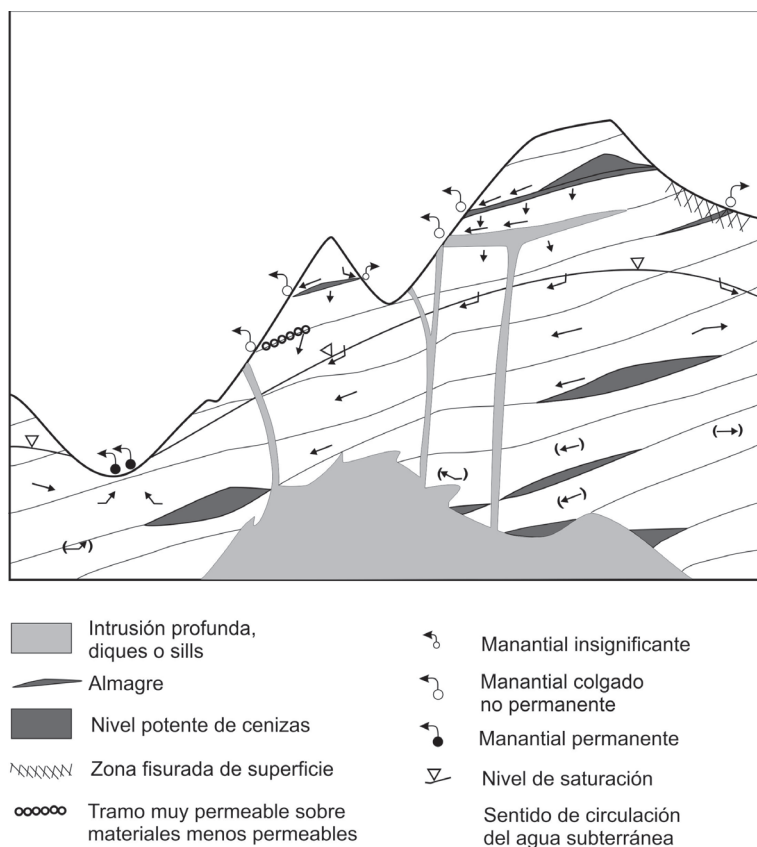


Figura 4.5: Flujo del agua en materiales volcánicos heterogéneos. Se señala la presencia de acuíferos y manantiales (nacientes) colgados y la existencia de un nivel saturado y nacientes principales (modificado de Custodio, 1978).

En general, las formaciones jóvenes contienen niveles de elevada permeabilidad y porosidad, asociados a los tramos escoriáceos de techo y base de las coladas, los depósitos piroclásticos de caída no soldados ni consolidados (tefra de lapilli) y las grietas de retracción. Sin embargo, ciertos tramos de las coladas pueden ser muy impermeables y continuos por falta de porosidad conectada y fisuración, lo mismo

que los almagres sobre los que se pueden apoyar. La alteración de la roca lleva consigo normalmente la disminución de la porosidad y la permeabilidad primarias, debido a compactación y al relleno de huecos por minerales secundarios. Con el paso del tiempo, el cierre de fracturas por compactación produce el mismo efecto, por lo que es fácilmente deducible que el factor tiempo juega un papel fundamental en contra de la “bondad hidrogeológica” de una determinada formación volcánica. Sin embargo el tiempo juega un papel distinto según las formaciones, ya que las menos compactas se degradan más rápidamente que las compactas. Además la presencia de gases endógenos profundos (en general de degasificación de magmas en profundidad), principalmente el CO_2 , acelera mucho la alteración.

4.4. Parámetros hidráulicos en rocas volcánicas

Al igual que en el resto de formaciones, la información más inmediata sobre la transmisividad de los materiales volcánicos se obtiene de los caudales específicos de los pozos (caudal dividido entre el descenso producido al bombear). Para poder comparar caudales específicos entre si y relacionarlos con la transmisividad del medio, conviene que sean obtenidos en condiciones similares (diámetro de las perforaciones, pérdidas de carga en el pozo, duración de los bombeos, etc.).

El valor de la transmisividad se obtiene mejor mediante ensayos de bombeo con piezómetros, pero estos a veces pueden ser difícilmente interpretables, tanto en los medios muy transmisivos (descensos poco notables) como en medios poco transmisivos, que tienen un radio de acción muy pequeño. Además, es poco frecuente disponer de puntos de observación. A todo esto hay que sumar los problemas inherentes a las heterogeneidades y diferencias de penetración entre el pozo y los piezómetros. El valor de la permeabilidad (k) se obtiene dividiendo la transmisividad (T) por el espesor del acuífero. En los medios fisurados es más difícil la caracterización. Por todo ello, la información existente es reducida.

En la práctica se encuentran valores de k , T y S muy variados, dependiendo del tipo de material, edad, alteración, fisuración secundaria, heterogeneidad, etc. En la tabla 4 se dan, como ejemplo, los parámetros hidráulicos que corresponden a la isla de Gran Canaria, que fueron deducidos durante el Proyecto SPA-15 a partir de unos 100 ensayos (SPA-15, 1975). Se trata de horquillas de valores que pueden presentar cierta amplitud, ya que dentro de cada formación existen diferencias en la fisuración y en el grado de alteración. Además, es frecuente que exista una reducción de la

Tabla 4.4: Valores de permeabilidad, transmisividad y coeficiente de almacenamiento obtenidos en ensayos de bombeo durante el Proyecto Canarias SPA-15 para la isla de Gran Canaria (SPA-15, 1975).

FORMACIONES	Permeabilidad (k) (m/día)	Transmisividad (T) (m ² /día)	Coeficiente de almacenamiento (S) (%)
Basaltos antiguos	0,05-0,50	5-20	0,5-1
Fm. Sálca	0,10-0,50	5-10	0,01-0,5
Roque-Nublo	0,3-0,75	25-50	1,5-3,5
Post-Roque Nublo y Basaltos Recientes	0,2-1	10-200	3-5
Detriticas (relacionadas con formaciones anteriores)	1,5-8	50-200	3-5
Detriticas (actuales)	2-25	200-800	5-10

permeabilidad con la profundidad, aunque en formaciones volcánicas esta disminución puede ser menor que en otras rocas duras.

Los terrenos volcánicos pueden presentar a veces valores muy superiores a los indicados. Por ejemplo, en otros lugares se citan valores de T de hasta 20000 m²/día en basaltos modernos con aluviones intercalados y valores de k de más de 1000 m/día en basaltos cuaternarios recientes en Lanzarote.

4.5. Existencia y características de un nivel de saturación regional

Los trabajos realizados en Canarias (SPA-15, 1975, Custodio, 1978) muestran claramente la existencia de un nivel de saturación regional en los terrenos volcánicos, a pesar de las heterogeneidades y discontinuidades que los caracterizan (Figura 4.5). Por encima del nivel de saturación pueden existir niveles acuíferos colgados de mayor o menor importancia, que se descargan mediante pequeños manantiales o rezumes (nacientes), o que se drenan principalmente a niveles más profundos; estos niveles colgados pueden instalarse en un aluvial o zona descomprimida superficial, o sobre cualquier otra heterogeneidad muy poco permeable de suficiente extensión lateral, tales como almagres, capas de arcilla, etc.

5. Las aguas subterráneas en Canarias

El Archipiélago Canario se caracteriza por la escasez de recursos hídricos. Tradicionalmente las aguas subterráneas han cubierto la mayor proporción de la demanda, aunque su aportación al conjunto de cada isla ha sufrido un descenso notable entre 1973 y 2009, entre el 93% y el 69% para el total del archipiélago. Esta tendencia es debida a su progresiva substitución por aguas obtenidas por medios no convencionales, como la desalación de agua de mar y la reutilización de aguas regeneradas (Tabla 4.5).

Tabla 4.5; Distribución de los recursos hídricos aprovechados en el Archipiélago Canario (elaborada a partir de datos de la planificación hidrológica).

RECURSOS DE AGUA (hm ³ /año)				
Año	Subterráneos	Superficiales	No naturales	TOTAL
1973	459	25	7	491
1978	450	19	16	485
1986	411	20	21	452
1991	393	21	34	448
1993	386	21	37	444
2000	326 + 32 (des.)	25	92 (des.) + 21 (reut.)	496
2009	343	27	107 (des.) + 19 (reut.)	496

Por su latitud, a Canarias le corresponde un clima seco y cálido, aunque la presencia de los vientos alisios confiere a las islas su peculiar caracterización. Debido a estos vientos, el clima de las islas varía según la altura, según les afecte más o menos el nivel de formación de nubes: islas bajas secas (Fuerteventura y Lanzarote), islas medias (La Gomera y El Hierro) e islas altas con áreas subhúmedas limitadas (Gran Canaria, Tenerife y La Palma). Las precipitaciones medias de las diferentes islas según los Planes Hidrológicos Insulares oscilan entre los 740 mm/año en La Palma y los 111 mm/año de Fuerteventura. Dentro de cada isla las variaciones climáticas pueden ser muy importantes.

Aunque en estado natural había pequeños cursos de agua permanente (Gran Canaria, La Palma y Gomera), la característica esencial actual de las islas es la carencia de corrientes continuas de agua, exceptuando el Barranco de Las Angustias en La Palma y el Barranco de El Cedro, en La Gomera. El funcionamiento de los barrancos

es esporádico, de manera que en cortos períodos de tiempo pueden tener lugar avenidas torrenciales, pero pronto quedan secos de nuevo, a lo que contribuye también la infiltración en los cauces y la evapotranspiración.

Además, la mayor o menor permeabilidad de los materiales viene condicionada a grandes rasgos por la edad de los materiales más antiguos de cada isla, que decrece hacia el Oeste. Así, la figura 6 muestra la distribución geográfica de las características que condicionan el clima y la geología de las islas.

5.1. Caracterización de los acuíferos insulares

En Canarias hay que sumar las grandes diferencias que se observan entre la geología de las diferentes islas a la heterogeneidad y anisotropía típica de los terrenos volcánicos. Las islas constituyen un archipiélago intraplaca cuyo origen responde a la existencia de un punto caliente (Carracedo et al, 2002), cuya evolución responde a pautas conocidas. Cada isla comienza con una fase de crecimiento submarino y continúa con una fase subaérea. Esta comienza por una etapa juvenil (volcán en escudo, caldera y post-caldera) y prosigue por una fase de rejuvenecimiento o post-erosiva separadas por un amplio periodo de escasa actividad volcánica. Según las

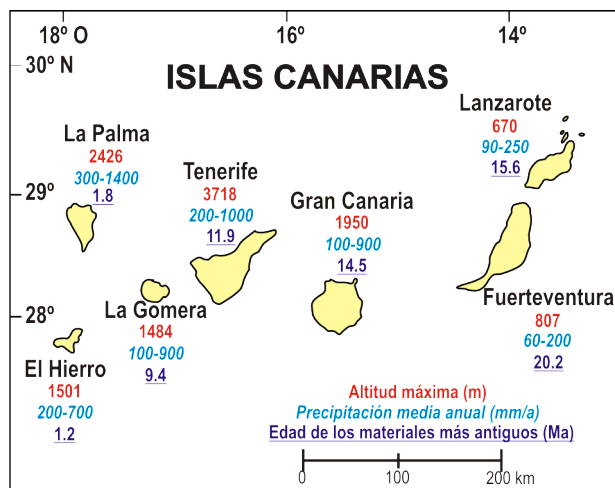


Figura 4.6: Localización del Archipiélago Canario con indicación de la edad, pluviometría y altitud máxima de cada isla (Modificado de Carracedo et al, 2002).

edades de los materiales juveniles de las Islas Canarias (Figura 4.6), La Palma y El Hierro se encuentran en la etapa de crecimiento juvenil, Tenerife, Gran Canaria, Fuerteventura y Lanzarote están en estadio senil con sólo pequeña actividad esporádica y residual y La Gomera en la etapa de inactividad volcánica.

En general, las islas responden a un esquema de materiales más permeables en superficie debido al tipo de volcanismo que los origina y a su mayor juventud, y un núcleo menos permeable en profundidad (complejos basales, materiales más antiguos y partes fuertemente inyectadas de diques), que pueden llegar a aflorar por levantamiento y erosión (Figura 4.7).

Como ya se indicó para terrenos volcánicos, cada isla presenta un nivel de saturación regional con heterogeneidades y discontinuidades. Surge así la idea de acuífero insular, discutida en un tiempo y hoy en día aceptada como situación general. No obstante, pueden existir importantes variantes, en especial en áreas e islas que corresponden al vulcanismo de arco-isla. A pequeña escala se puede hablar de acuíferos diferentes a nivel local pero relacionados lateralmente, pero a mayor escala de observación debe hablarse de un sólo acuífero en cada isla.

El sistema de flujo a escala insular se puede esquematizar como un cuerpo único de agua en el que la recarga tiene lugar a cotas altas y la descarga se produce hacia el mar y en los fondos de los barrancos muy encajados. En el núcleo la circulación es muy lenta y el agua de recarga se canaliza preferentemente por los materiales más permeables superficiales. La baja capacidad de transmisión de agua de los materiales antiguos del núcleo hace que cuando éstos afloren se originen áreas muy

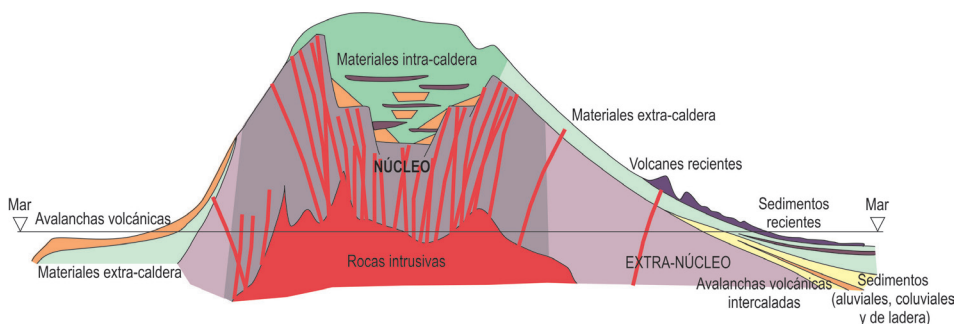


Figura 4.7; Esquema hidrogeológico de una isla como Gran Canaria. El flujo de agua subterránea se produce fundamentalmente por los materiales superficiales más permeables, aunque se trata de un sistema acuífero único.

abarrancables, con elevada escorrentía directa de tormenta, como en el interior de Gran Canaria, con numerosos manantiales pequeños (Custodio, 1983).

El aprovechamiento de las aguas subterráneas se lleva a cabo mediante una gran variedad de obras (véase el capítulo 4), desarrolladas a partir de finales del siglo XIX. Las obras tradicionales son los pozos y las galerías, aunque pueden encontrarse todo tipo de híbridos entre ellas: pozos con galerías en su interior, galerías con pozos en su frente, etc. Los pozos “canarios” son excavaciones verticales de 3 m de diámetro cuya profundidad depende de la altura a que se corte el nivel piezométrico. Se conocen pozos con más de 500 m de profundidad. Las galerías son excavaciones típicamente de 1,80 m de altura y 1,5 m de ancho, con una ligera pendiente ascendente según se adentran en la montaña, para que la descarga del agua se lleve a cabo por gravedad, y con longitudes de hasta varios kilómetros. Existen ambos tipos de obras en todas las islas, aunque en Gran Canaria domina la explotación por medio de pozos, con más de 2000 pozos censados, y en Tenerife dominan las galerías, superándose los 1600 km de perforación en más de un millar de ellas.

Estas obras eran excavadas a mano y con explosivos, habiéndose llevado bastantes vidas humanas por delante. Actualmente, las obras se realizan con máquinas a percusión o rotopercusión, con menor diámetro, y se conocen en el argot canario como “sondeos” cuando son verticales y “catas” si son horizontales, y pueden llevarse a cabo en el fondo de pozos o dentro de galerías tradicionales, o directamente sobre el terreno.

5.2. Evolución temporal de los acuíferos insulares

El funcionamiento hidrológico de los Sistemas Acuíferos canarios ha sufrido una profunda alteración desde las primeras acciones humanas encaminadas a la obtención de recursos subterráneos, fundamentalmente en las islas de Gran Canaria y Tenerife, y en menor grado en La Palma. Cada acuífero insular puede ser comparado con un gran depósito de agua con una entrada constante (recarga natural), que es pequeña en comparación con la cantidad de agua contenida en el depósito (reservas), con una salida natural (descarga al mar y por nacientes). Al comenzar la explotación se modifica el equilibrio anterior, aumentando las descargas del depósito pero sin que aumente sensiblemente la recarga, por lo que el nivel de reservas desciende hasta que se llegue a una nueva situación de equilibrio (Figura 4.8).

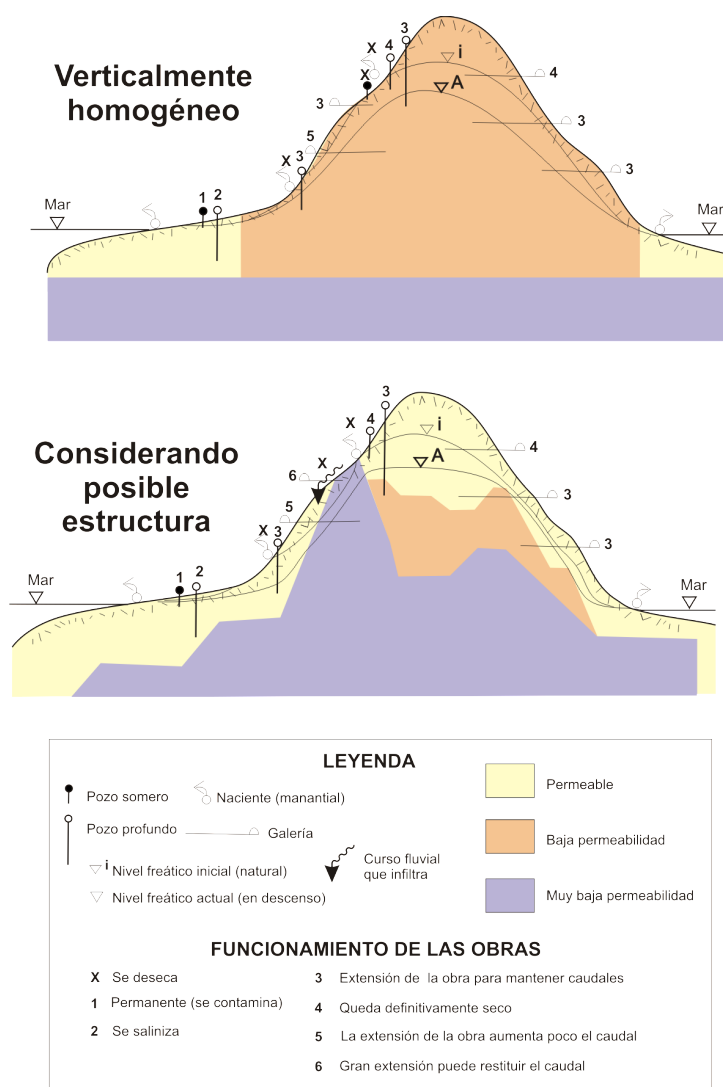


Figura 4.8: Esquemas de funcionamiento hídrico natural y con explotación intensiva en Canarias. Corresponde a una isla alta y el corte está inspirado en Gran Canaria. La figura superior muestra el caso de un núcleo de baja permeabilidad sobre un substrato muy poco permeable y con una periferia de materiales volcánicos jóvenes o sedimentos. La figura inferior trata de introducir la existencia de una cierta estructura volcánica interna con un zócalo de muy baja permeabilidad, caldera central en parte deslizada, con relleno de materiales de baja permeabilidad y un recubrimiento de materiales volcánicos jóvenes intra y extracaldera. En ambos casos los gradientes piezométricos costeros varían poco entre la situación natural inicial y la actual de explotación intensiva en medianías y cumbres (Custodio y Cabrera, 2002).

La situación actual de los acuíferos insulares, fundamentalmente en Gran Canaria y Tenerife, y en menor grado en La Palma, es de consumo de la reserva, con los niveles descendiendo continuamente y por tanto con necesidad de reprofundizaciones sucesivas de pozos y galerías para llegar al agua. Se produce así largamente una dinámica no sustentable, aún lejos del posible equilibrio (si es que entonces puede continuar), que implica disminuir las reservas.

Paralelamente a la disminución progresiva de los niveles freáticos se ha observado un empeoramiento en la calidad de las aguas subterráneas. Los factores que influyen en esta degradación pueden ser de origen natural, como el acceso a aguas antiguas con mayor mineralización y con CO₂ disuelto, o de origen antrópico: intrusión marina, contaminación por retornos de riego y contaminaciones puntuales. La presencia de aguas cada vez más salinas, a veces con indicios de intrusión marina en acuíferos costeros o con concentraciones de nitratos que en ocasiones alcanzan y superan los 400 mg/L y con residuos de plaguicidas, son indicativos claros de que estos fenómenos se están produciendo en las islas, aunque en cada caso deben ser estudiados en detalle para ser caracterizados (Cabrera, 1997).

Ante esta perspectiva, la planificación hidrológica tiende a diversificar la procedencia de los recursos hídricos, animando a la utilización de recursos hídricos alternativos (desalación de agua de mar y reutilización de aguas depuradas). Cada Plan Hidrológico y cada Consejo Insular de Aguas utiliza criterios diferentes a la hora de ordenar los recursos. Hay que destacar la incertidumbre inherente al manejo de ciertos términos del balance hídrico, como la recarga o las salidas de agua al mar, por lo que la utilización de criterios distintos en los estudios realizados ha llevado a estimaciones no siempre suficientemente cotejadas con datos.

No obstante, las aguas subterráneas han sido, son y continuarán siendo esenciales para el abastecimiento. Por ello requieren mayor atención que la que se les da actualmente, a veces desproporcionadamente respecto a la que se da a los otros recursos de agua. En parte ello se debe a que éstos últimos son más sencillos y “dóciles” para la Administración del Agua, y quedan dentro de lo que se tiene experiencia, mientras que las aguas subterráneas siguen gestionándose como privadas a pesar de ser un dominio público y tienen múltiples propietarios. Su planificación y gestión requiere nuevos métodos y un cambio de paradigmas, que son necesarios y urgentes.

Bibliografía consultada y referencias

CABRERA, M.C. (1997). *Problemas actuales y futuros de salinidad y calidad del agua subterránea en Canarias y su incidencia en la planificación hídrica y en las actuaciones*. En Cabrera et al

- (ed.): *Las aguas Subterráneas en la Planificación Hidrológica en las Islas Canarias*. Asociación Internacional de Hidrogeólogos, Grupo Español: 145-151.
- CABRERA, M.C. y CUSTODIO, E. (2004). *Groundwater flow in a volcanic-sedimentary coastal aquifer: Telde area, Gran Canaria, Canary Islands, Spain*. Hydrogeology Journal 12(3): 1431-2174.
- CARRACEDO, J.C.; PÉREZ TORRADO, F.J.; ANCOCHEA, E.; MECO, J.; HERNÁN, F.; CUBAS, C.R.; CASILLAS, R.; RODRÍGUEZ BADIOLA, E. Y AHIJADO, A. (2002): *Cenozoic volcanism II: The Canary Islands*. En W. Gibbons and T. Moreno (eds.): *The Geology of Spain*. The Geological Society of London: 439-472.
- CRUZ, T. CABRERA, M.C. y HEREDIA, J. (2010). *Flow and transport simulation models in a volcanic-sedimentary aquifer: La Aldea aquifer (Gran Canaria, Canary Islands)*. XXXVIII IAH Congress, Groundwater Quality Sustainability. Abstracts: 695-697. CD printing: 1987-1993.
- COMISIÓN DOCENTE CURSO INTERNACIONAL HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA (2009). *Hidrogeología: conceptos básicos de hidrología subterránea*. Ed. FCIHS. Barcelona, 768 pp.
- CUSTODIO, E. (1978). *Geohidrología de terrenos e islas volcánicas*. Instituto de Hidrología. Centro de Estudios Hidrográficos, publicación 128, Madrid. 303 pp.
- CUSTODIO, E. (1983). *Nuevas contribuciones al conocimiento hidrogeológico de las Islas Canarias*. In: Proc. III Symp. Hydrogeology. Madrid. Hydrogeología y Recursos Hidráulicos, vol. I.: 705-717.
- CUSTODIO, E. (1989). *Groundwater characteristics and problems in volcanic rock terrains*. Isotope Techniques in the Study of the Hydrology of Fractured and Fissured Rocks. STI/PUB/790. International Atomic Energy Agency. Vienna: 87-137.
- CUSTODIO, E. (2007). *Groundwater in volcanic hard rocks*. In J. Krásný and J.M. Sharp Jr.: *Groundwater in Fractured Rocks*. Selected papers 9., Intern. Assoc. Hydrogeologists. Taylor & Francis, London: 95-108.
- CUSTODIO, E. Y CABRERA, M.C. (2002). *¿Cómo convivir con la escasez de agua? El caso de las Islas Canarias*. Bol. Geol. Min. Vol. 113 (3): 243-258.
- CUSTODIO, E. Y LLAMAS, M.R. (1976). *Hidrología subterránea*. 2 Vols. Ed. Omega, Barcelona, 2359 pp. (reedición 1983).
- GASPARINI, A.; CUSTODIO, E.; FONTES, J.Ch.; JIMENEZ, J. y NUÑEZ, J.A. (1990). *Exemple d'étude géochimique et isotopique de circulations aquifères en terrain volcanique sous climat semi-aride (Amurga, Gran Canaria, Iles Canaries)*. Journal of Hydrology, 114: 61-91.
- HERRERA, Ch. y CUSTODIO, E. (2003). *Hipótesis sobre el origen de la salinidad de las aguas subterráneas en la isla de Fuerteventura*. Archipiélago de Canarias, España. Bol. Geol. Minero. Madrid: 114(4): 433-452.
- MARRERO, R. (2010). *Modelo hidrogeoquímico del acuífero de las Cañadas del Teide, Tenerife, Islas Canarias*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. 499 pp. + anejos.
- SPA-15 (1975): *Estudio científico de los recursos de agua en las Islas Canarias (SPA/69/515)*. Minist. Obras Públ. Dir. Gral. Obr. Hidr. UNESCO. Las Palmas de Gran Canaria, Madrid. 3 vol.+ mapas.

Métodos de estudio hidrogeológicos e hidrogeoquímicos

Emilio Custodio Gimena
María del Carmen Cabrera Santana

1. Introducción

Los métodos de estudio hidrogeológicos tienen como objetivo caracterizar y medir el agua subterránea en lo que hace referencia al agua (flujo), a las sustancias disueltas que transporta (transporte de masa) y a los intercambios de agua y solutos con el medio (relación roca-agua). Esto se hace para:

- Establecer el modelo conceptual de funcionamiento de los sistemas acuíferos para entender su funcionamiento.
- Cuantificar el flujo y el transporte del agua subterránea por los sistemas acuíferos.
- Establecer las relaciones con otras partes del ciclo hidrológico: aguas superficiales, mar, otros acuíferos y la biosfera, y también con los procesos geodinámicos internos y externos en los que intervienen las aguas subterráneas, incluyendo la génesis de minerales.
- Utilizar el agua subterránea como un recurso clave.
- Establecer su valor económico y social.

- Proporcionar métodos y parámetros que permitan evaluar y cuantificar los efectos de las actividades del hombre (efectos antrópicos) sobre los sistemas acuíferos y sobre los otros sistemas con los que están en relación, Estos efectos pueden ser causados por el aprovechamiento de las aguas subterráneas, las obras públicas y construcciones, la agricultura; se incluye el medio ambiente, el medio urbano y la minería, y se tiene en cuenta entre otros aspectos la variabilidad climática y el cambio climático futuro.
- Lo que se expone en este capítulo está relacionado estrechamente con el contenido del capítulo 4. No se vuelve a presentar y definir lo que se dice el mismo.

A continuación se expone una visión general de los métodos, sin entrar en sus detalles y modo de aplicación. Para un tratamiento de detalle hay que recurrir a los textos especializados, por ejemplo Custodio y Llamas (1976) y CIHS (2009) en lengua castellana y entre los en lengua inglesa los de Delleur (2007), de Marsily (1986), Freeze y Cherry (1979) y Schwartz y Zhang (2007), y los introductorios de Price (2004) y Younger (2007).

2. Recursos y reservas de agua subterránea

En un sistema acuífero la recarga anual (recurso renovable), R , es sólo una pequeña fracción de la cantidad de agua existente (reserva), V . El cociente V/R representa el tiempo medio de renovación, τ , que es un importante parámetro; puede variar entre unos pocos años en sistemas pequeños bien recargados, hasta miles de años en sistemas grandes y acuíferos de regiones áridas.

El tiempo de renovación medio de un sistema acuífero difiere del de los acuíferos del mismo. Así, el agua puede fluir más rápidamente por los acuíferos, con menor tiempo de renovación, mientras que dicho tiempo de renovación es mucho mayor en los acuitardos. Pero entre los acuíferos y acuitardos hay intercambio de agua y solutos, a veces de forma tridimensional y compleja. Los métodos de estudio deben poder generar la información necesaria para entender estas interrelaciones e intercambios, lo que supone caracterizar por separado las distintas partes aproximadamente homogéneas en que se puede dividir un sistema acuífero, o sea el conjunto de acuíferos y acuitardos que forman una unidad.

Las reservas de agua subterránea están constituidas por el agua contenida en el sistema acuífero o sus partes. Gracias a ellas, una recarga variable en el tiempo (y en el espacio) se convierte en una descarga notablemente más regular. El volumen de agua que interviene en esa regulación se suele llamar reserva dinámica, la sometida a renovación, que es menor que la reserva total, que puede incluir una parte no renovable o de mucho más lenta renovación.

La explotación de un acuífero de un sistema acuífero supone una modificación hidráulica del funcionamiento natural, de modo que a largo plazo lo que se extrae se acaba por detraer de las descargas naturales (Custodio, 2001; Custodio y Cardoso Da Silva, 2008). La duración del periodo de ajuste puede durar desde meses a miles de años, dependiendo de las características medias del acuífero. Ese tiempo se puede medir aproximadamente como $\tau=L^2T/S$, en la que L es el tamaño del acuífero, T es la transmisividad y S es el coeficiente de almacenamiento. Es un acuífero libre S tiende a la porosidad drenable.

Cuando se inicia la explotación de un acuífero, o cualquier otro tipo de modificación de las condiciones externas, se entra en un periodo transitorio, durante el cual se produce un progresivo descenso de niveles piezométricos, cuando la disminución de las descargas es menor que las extracciones, el balance de agua se cierra con una disminución de las reservas dinámicas, rápida al principio y luego cada vez menor.

En el caso en que las extracciones superen a la recarga el consumo de reservas es permanente -minería del agua subterránea- y las reservas se van consumiendo progresivamente.

Esta dualidad recurso/reserva del agua subterránea es una característica muy específica de los sistemas acuíferos, que los diferencia en cuanto al comportamiento de las otras partes del ciclo hidrológico. Los métodos de estudio deben permitir medir y cuantificar esta dinámica, lo que en ocasiones puede ser difícil, y requiere combinar varios de ellos.

3. Papel de las aguas subterráneas en la naturaleza y para usos humanos

En este estado no influenciado, la recarga se convierte en descargas naturales, que adoptan diferentes formas según los casos. Se trata de manantiales (nacientes) - unas veces concentrados y otras difusos-, caudal de base de ríos, alimentación a

lagos, lagunas y humedales –una parte, que puede ser toda en cuencas cerradas, se evapora, –, sostenimiento de áreas de vegetación freatofítica –se transpira– y transferencia a otros acuíferos. Estas descargas son manifestaciones del agua subterránea, tanto más importantes ecológica y paisajísticamente, cuanto más árido es el clima. Estas descargas proporcionan importantes servicios ecológicos, que pueden tener un elevado valor económico para la sociedad. En áreas áridas son el origen de los escasos nacientes, cursos de agua permanentes, humedales, áreas de vegetación freatofítica y ribereña, oasis y bofedales.

También la apropiación –extracción– del agua subterránea produce un recurso de gran importancia para la población y sus actividades económicas, aumentada por su ubicuidad, disponibilidad, resiliencia ante sequías y relativa protección de la calidad (Custodio, 2005; Llamas et al., 2001; Ragone, et al., 2006). La presión para su apropiación es mayor cuanto más árido es el clima. En áreas semiáridas y áridas, en general domina la demanda de agua para regadío.

La extracción del agua subterránea supone una interferencia con las descargas naturales y sus servicios ecológicos, que puede llegar a ser muy importante. Para poder valorar las interferencias y su frecuente larga evolución temporal, es necesario aplicar métodos que permitan cuantificarlas, a fin de planificar y gestionar los acuíferos y poder prever la evolución.

4. Reconocimiento de la geometría y piezometría de los sistemas acuíferos

Los sistemas acuíferos no son observables directamente, por lo que hay que deducir su geometría y características indirectamente o mediante reconocimientos localizados, siempre costosos. En cualquier caso la tridimensionalidad y la heterogeneidad son aspectos esenciales que deben ser correctamente caracterizados.

Una primera aproximación al conocimiento es la geológica, es decir, construir un modelo geológico tridimensional a partir de la información geológica y de las perforaciones disponibles, y de las relaciones internas y con otros sistemas. Posteriormente ese modelo debe ser convertido en hidrogeológico, teniendo en cuenta que no hay relaciones biunívocas directas, y que la experiencia local es importante. Con frecuencia quedan imprecisiones y vacíos.

Una aproximación adicional se puede obtener mediante la geofísica. Los métodos geofísicos de superficie tratan de identificar variaciones de ciertas propiedades físicas del terreno y del agua, en el territorio y en profundidad. Tales son las propiedades eléctricas (resistividad/conductividad) y sónicas, tanto naturales como inducidas, además de las gravimétricas y magnéticas naturales. Unas determinan propiedades medias sobre un gran volumen de terreno y otras son más localizadas y focalizadas (de mayor detalle en profundidad), con penetraciones variables según los métodos y de cómo se aplican. La distribución de la propiedad que se mide suele ser el resultado de un proceso de inversión, a veces complejo y con notables incertidumbres. Pero la propiedad física que se mide no se corresponde con propiedades hidrogeológicas. Hay que hacer una interpretación basada en supuestos básicos y en la experiencia. Para reducir la incertidumbre asociada hace falta combinar varios métodos y, si es posible, reconocimientos y datos adicionales.

Las perforaciones (sondeos) constituyen el método más directo de reconocer el terreno, en general de forma vertical, y de obtener acceso al agua subterránea. Es costoso y puntual, y por lo tanto suele ser necesario disponer de un conjunto de sondeos para lograr un reconocimiento que represente a todo el territorio que se considera. Con frecuencia los recursos económicos disponibles limitan mucho –o incluso pueden hacer inviable– este tipo de reconocimiento, en especial en sistemas acuíferos de gran espesor o acuíferos profundos. Por eso primero se trata de recuperar e interpretar toda la información posible de los sondeos de reconocimiento y de captación de agua subterránea –o galerías drenantes– existentes, tratando de obtener la mejor interpretación posible, tras eliminar los datos confusos o erróneos.

Las perforaciones de reconocimiento se pueden realizar utilizando diferentes técnicas en función del tipo de terreno, profundidad y diámetro requerido, y de si se han de obtener muestras de terreno y agua. En terrenos no consolidados y hasta pocos metros profundidad se pueden emplear barrenas manuales o mecánicas, hınca, chorro de agua y otros, pero los métodos más comunes son la perforación mecánica a rotación, con martillo de fondo accionado por aire (rotoperusión), y a percusión con cable. Se puede perforar sin toma de muestra, extrayendo el detritus de terreno que produce la herramienta de perforación por arrastre hasta la superficie con el agua o el aire utilizados. La información litológica suele ser pobre y a veces insegura. Para mayor detalle se perfora a rotación con corona y sacatestigos, que permite recuperar testigos de terreno, continuamente (si es posible) o de tramos concretos de especial interés. Para profundidades grandes es costoso y lento, por lo que raramente se recurre a testigos por el gran coste que supone. Sin embargo, hay métodos de obtener testigos sin extraer el varillaje de perforación (wire-line), aunque no está exento de problemas prácticos.

Cuando los testigos no son suficientes para caracterizar el terreno o sólo se dispone de detritus, es posible obtener información –es recomendable hacerlo– mediante la realización de testificación geofísica o digrafías. Consiste en la toma de datos a partir de sensores que se desplazan a lo largo del sondeo. Como toda técnica geofísica se mide una propiedad física natural o inducida, que luego hay que interpretar geológicamente y de la que se deducen propiedades hidrogeológicas. Hay muchas formas de testificación. Las más comunes son las eléctricas –potencial espontáneo, resistencia monoelectródica y resistividad eléctrica– y las de radiación gamma natural, además de las simples de conductividad eléctrica del agua y temperatura, pero también pueden ser sónicas o nucleares inducidas. Estas últimas requieren personal especializado y permisos estrictos para poder realizarlas, aunque su interpretación es sencilla.

Las perforaciones pueden realizarse para reconocimiento del terreno y para medir niveles piezométricos. Si es posible se combinan ambos objetivos, pero para lograr el segundo objetivo es necesario equipar el sondeo con una entubación, rejilla (para el contacto del interior del tubo con el acuífero) y cementaciones y sellos para que lo que se mida corresponda a una cierta posición vertical. También se suelen equipar para la toma de muestras, en cuyo caso el diámetro debe poner permitir el acceso de sistemas de bombeo y/o de toma de muestras.

En lo posible los piezómetros y los sondeos de muestreo de agua deben ser específicamente contruidos y equipados, aunque por razones económicas y de oportunidad se trata de obtener esos datos de los pozos y sondeos existentes. No obstante es importante conocer como son y como están equipadas esas perforaciones para saber que representa el nivel piezométrico que se mide y la muestra de agua que se toma; de otro modo se pueden cometer errores de interpretación.

Salvo en sondeos con rejillas cortas y bien aisladas y con renovación del agua, los niveles pueden representar un promedio de valores variables a lo largo de la vertical, y la muestra puede ser una mezcla, como también lo suele ser la descarga de manantiales (Fig. 5.1). Para una correcta interpretación de los datos hay que tener presentes estas circunstancias.

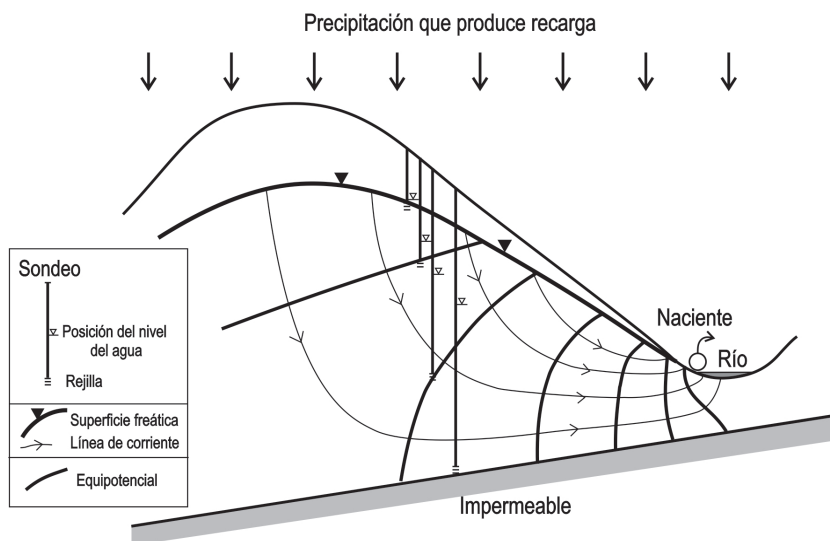


Figura 5.1; Dibujo esquemático del sistema de flujo entre un interfluvio y ladera de recarga y la descarga en un río y nacientes ribereños. En sentido vertical el nivel piezométrico decrece en profundidad en las áreas de recarga y asciende en las de descarga. Eso se refleja en la batería de sondeos próximos con rejillas aisladas entre sí y a distintas profundidades. El agua descargada en el río y en el naciente es una mezcla de diferentes tubos de flujo, con diferentes áreas de recarga y tiempos de residencia.

5. Métodos de construcción de captaciones

Una captación de agua subterránea busca obtener el mayor caudal con el menor descenso de niveles, con la debida protección de la calidad del agua. Salvo el caso –no común– de galerías o minas de agua (aunque es lo más frecuente en Tenerife) o drenes en terrenos de nivel freático muy somero, en general se trata de pozos de los que hay que extraer el agua por bombeo, lo que se debe hacer con el menor consumo de energía, o sea con la mayor eficiencia hidráulica (véase Custodio y Llamas, 1976, sec. 17; CIHS, 2009).

Un pozo es en general una perforación vertical realizada mecánicamente, salvo los excavados de épocas muy anteriores, o los clásicos “pozos canarios” de gran diámetro, muy abundantes en Gran Canaria, en que los se ha combinado elementos mecánicos, de explosivos y manuales. Los métodos de perforación mecánica en general no extraen testigos de terreno –con la excepción de lo que es tradicional en Mallorca– sino detritus. Los métodos más comunes son:

- 1) **Perforación a percusión con cable.** Usa un trepano que rompe el terreno por golpeteo. El detritus, en forma de lodo, se saca periódicamente con una “cuchara” o válvula. Es sencillo pero lento. Es menos adecuado para rocas duras abrasivas, como las volcánicas.
- 2) **Perforación a rotación.**
 - a) Con circulación directa, en que se inyecta agua o lodo por el interior de un varillaje y que luego asciende por el exterior, por el espacio entre el varillaje y la pared de la perforación, arrastrando los detritus. Se perfora con triconos giratorios sobre cojinetes, de dientes duros, o trialetas para terrenos blandos. Es el método más general.
 - b) Con circulación inversa, en que se introduce agua entre el varillaje y la perforación y se extrae por bombeo por el interior del varillaje. Adecuado para materiales sueltos granulares y profundidad moderada.
- 3) **Rotopercusión** con martillo de fondo accionado por aire a gran presión, que en su salida arrastra el detritus. Es rápido y adecuado para roca dura, como las volcánicas compactas, y menos para materiales no consolidados o muy fracturados.

Pero un pozo es más que una perforación. Debe tener:

- Entubación para proteger la bomba y mantener las paredes en los tramos que se derrumban.
- En materiales sueltos, cierre de fondo para evitar aterramiento desde abajo.
- Cementaciones y sellos para aislar los tramos indeseables y evitar entrada de agua desde la superficie y desde otros niveles permeables.
- Rejillas (zonas filtrantes) si el terreno se derrumba, de modo que pueda entrar el agua subterránea en la perforación sin arrastres del terreno, y con la menor pérdida de carga. Requiere un diseño adecuado y una buena técnica constructiva. Hay tres variantes:
 - a) El terreno no se derrumba. Sin precauciones especiales.

- b) El terreno contiene finos y gruesos. La rejilla debe retener los gruesos; los finos del entorno se extraen previamente en el proceso llamado de desarrollo, hasta que la parte del entorno hace de filtro para los mismos y ya no se mueven al bombear.
- c) El terreno es fino y la rejilla no evita su penetración; se coloca alrededor de la rejilla un relleno (macizo) de arena o grava que actúa de filtro estabilizador intermedio.

Para diseñar el pozo debe considerarse la profundidad y el diámetro que permita albergar la bomba que hay instalar y otros equipamientos tales como sensores. El pozo debe ser vertical y bien alineado. Si se destina a abastecimiento humano además debería ser previamente desinfectado. Con rocas carbonatadas se puede disminuir el descenso hidráulico con un tratamiento inicial de acidificación. No es efectivo en rocas volcánicas.

El mayor diámetro de la perforación aumenta poco la producción de agua en terrenos granulares o muy fisurados, pero cuando se trata de roca poco permeable fisurada, o el tramo acuífero es de poco espesor, el aumento del diámetro favorece un mayor caudal, pero con un incremento del coste de construcción.

Para ayudar a colocar adecuadamente las cementaciones, sellos y rejillas en el interior del pozo, y para localizar los tramos que conviene aislar, cuando no se dispone de un muestreo fiable del terreno –que es lo más común– se puede recurrir a la testificación geofísica, aunque hay que usar los métodos adecuados en función de la profundidad del nivel del agua, de que la perforación esté o no entubada, contenga lodo o agua o esté en seco, etc. Se trata de los métodos ya comentados antes, que ahora se pueden complementar con otros específicos, como el calibre (ayuda a evaluar el volumen de cemento a emplear), inclinación, inducción eléctrica, etc.

Un pozo de bombeo no surgente requiere que se instale una bomba para extraer al agua. Actualmente suelen ser grupos compactos motobomba de eje vertical, con diámetros adecuados. En lo posible la bomba debe estar protegida por un entubado y colocada por encima de la rejilla menos profunda. En el caso de niveles profundos suele haber una válvula de pie para evitar que la tubería de impulsión se vacíe y al arrancar la bomba se produzca una fuerte punta de intensidad que dañe al motor; pero si el agua tiene sedimentos, al depositarse pueden obstruir la válvula de pie. El problema mencionado es ahora menos grave con motores que arrancan con ayuda de un variador de frecuencia. Para que la bomba no cavite –no tome aire– se suele instalar un sensor de nivel mínimo. En otros casos el funcionamiento se puede auto-

matizar con sensores de nivel mínimo y máximo, pero lo deseable es conseguir un funcionamiento sin interrupciones frecuentes, lo más continuo posible.

6. Métodos hidrodinámicos de estudio

Los métodos hidrodinámicos de estudio parten en general de las superficies piezométricas (Fig. 5.2), y se basan en la determinación del gradiente piezométrico y su transformación en caudal (flujo) de agua subterránea mediante la aplicación de la Ley de Darcy. Eso supone considerar la piezometría y disponer de los parámetros hidráulicos. En cualquier caso hay que tener en cuenta que el flujo del agua subterránea es tridimensional, aunque en una buena parte de un acuífero el flujo es predominantemente horizontal; no es así cerca de lugares de descarga y de extracción, o de recarga importante, ni entre acuíferos separados por acuitardos, o en acuíferos inclinados.

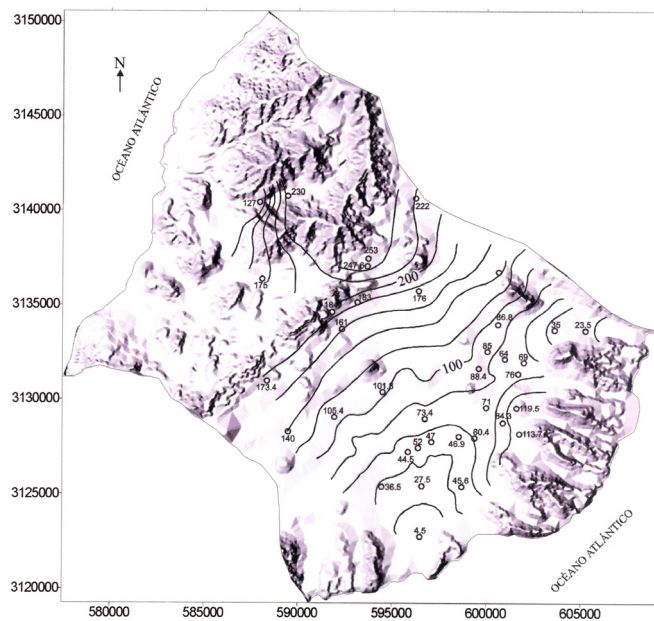


Figura 5.2: Evolución de la piezometría del periodo 1998–1999 en el Macizo de Betancuria, centro de Fuerteventura, en una zona árida. Isopiezías cada 20 m. Los elevados gradientes en el área montañosa, más lluviosa y mucho menos permeable se atenúan hacia el corredor central NE–SW con materiales más permeables y un recubrimiento central reciente, para concentrarse en el tramo final los barrancos situados al S y al E, en el límite del dibujo. (De la tesis de C. Herrera).

La medida del nivel piezométrico debe referirse a un lugar y a una profundidad; los valores promedios obtenidos de un pozo o piezómetro con varias rejillas o con flujo a lo largo de la perforación, pueden dar lugar a serios errores interpretativos.

Las superficies piezométricas deben corresponder a un acuífero determinado, en su caso a la superficie freática. De ellas se puede deducir el movimiento del agua y los gradientes hidráulicos. En el caso de un medio isótropo en la horizontal las líneas de corriente son perpendiculares a las isopiezas o líneas de igual nivel piezométrico. No es así si el medio es anisótropo. Si hay detalle suficiente (elevada densidad de puntos), su forma indica no sólo el flujo sino las áreas de recarga y descarga, posibles heterogeneidades y anomalías que pueden ayudar a confirmar o modificar el modelo conceptual de funcionamiento. La existencia de gradientes piezométricos verticales indican áreas de recarga si son descendentes y de descarga si son ascendentes, o de transferencias entre acuíferos.

Para obtener los parámetros hidráulicos de los acuíferos se puede recurrir a ensayos en muestras, análisis de oscilaciones piezométricas debidas a cambios de la presión atmosférica, o las oscilaciones mareales en el caso de acuíferos costeros, a cambios del nivel de ríos y lagos, etc. Pero lo más común es recurrir a ensayos en perforaciones, y en especial a ensayos de bombeo. Un ensayo de bombeo consiste en bombear a caudal constante en un pozo durante un cierto tiempo y observar como descienden los niveles en el mismo, y mejor en piezómetros y pozos próximos, y también después de la parada de la bomba. Los valores de la transmisividad (T) y del coeficiente de almacenamiento (S) se deducen del tratamiento gráfico o mediante programas apropiados de la evolución del descenso observado a lo largo del tiempo o de la distancia.

El análisis del flujo del agua subterránea se puede hacer manualmente a partir de los gradientes hidráulicos y de los parámetros del acuífero mediante la Ley de Darcy, y balances de agua generales. Pero se puede hacer numéricamente resolviendo la ecuación del balance de agua en un determinado volumen representativo, y para ello se dispone de numerosos códigos y programas numéricos. Lo más común es discretizar el acuífero en pequeñas porciones, según una malla en 2 ó 3 dimensiones, según convenga, de forma que se tenga en cuenta las heterogeneidades, condiciones en los bordes (contornos), situación de extracciones, intercambios con aguas superficiales y otras circunstancias. En cada unidad se establece que para el agua: entrada - salida = aumento del almacenamiento.

Las entradas y salidas se calculan por la Ley de Darcy, y el aumento de almacenamiento a través del coeficiente de almacenamiento y la variación del nivel piezométrico en un cierto incremento de tiempo. Lo que entra en una celda es lo que sale de

las vecinas que le aportan, más las recargas, y lo que sale es el agua que se transfiere a las celdas vecinas, más las salidas como extracciones o como agua superficial.

Estos códigos, aplicados a un modelo de funcionamiento y parámetros del acuífero o sistema acuífero, reproducen las superficies piezométricas y su evolución en el tiempo: es la simulación. Estas simulaciones pueden ser estacionarias, cuando no hay variaciones a lo largo del tiempo, y no estacionarias o transitorias cuando los niveles piezométricos varían temporalmente.

Las diferencias entre lo simulado y lo observado, tanto en el espacio, como en profundidad, como a lo largo del tiempo si el régimen es no estacionario, se utilizan para retocar los parámetros, que son inciertos, y así reducir la incertidumbre de los mismos. Es el proceso de calibración, que permite lograr una herramienta matemática más representativa de las condiciones en las que se ha hecho el estudio. Pero sólo sirve para predicciones de otras situaciones similares o de la evolución si el tiempo de predicción no es mucho más largo que el de calibración. Cuanto mayores sean las variaciones o el tiempo, menor la fiabilidad. Por eso son herramientas dinámicas, que se han de actualizar a medida que se van obteniendo datos y mejorando el conocimiento.

El estudio de hidrogramas de aguas subterráneas –evolución de una variable a lo largo del tiempo– puede dar informaciones cuantitativas. En el caso de caudales de manantiales, la recesión (disminución de niveles) tras las crecidas depende de la difusividad hidráulica del acuífero y de su tamaño, y viene expresada por un parámetro (α), cuya inversa es proporcional al tiempo de renovación. Si Q es el caudal del manantial, las reservas dinámicas asociadas valen $V=Q/\alpha$.

En el caso de ríos, el estudio es más difícil ya que en el hidrograma hay que separar lo que es escorrentía superficial directa y subsuperficial, y eso enmascara el agotamiento que corresponde a las descargas subterráneas. Se puede tratar de mejorar la separación por balances químicos de los componentes del agua a lo largo del tiempo, por ejemplo de la conductividad eléctrica o el contenido en cloruros o sulfatos, si el contenido en las aguas subterráneas es claramente diferente del aporte superficial. Pero esa separación, cuando se puede hacer, no siempre coincide con la hidráulica.

Los hidrogramas de niveles de un piezómetro o pozo, si es representativo de una parte concreta del acuífero, también contienen curvas de recesión, cuyo parámetro exponencial α es igual al anterior, pero no permite evaluar caudales o reservas a menos que se disponga de informaciones adicionales. Sin embargo, informan sobre las características hidráulicas globales del acuífero.

7. Métodos de evaluación de la recarga

La recarga es la entrada de agua a los acuíferos, y por lo tanto un valor esencial. Sin embargo es uno de los valores más difíciles de conocer con detalle y precisión. Esto se trata en diversos textos, como Custodio et al. (1997); De Vries y Simmers (2002); Lerner et al. (1990) y Simmers (1997). En general la recarga es incierta, por lo cual debe evaluarse esa incertidumbre, aunque desafortunadamente se hace en pocas ocasiones.

Se pueden considerar varias formas de recarga:

- **Difusa**, la que proviene de la infiltración de la precipitación sobre el territorio, en general como lluvia, pero también como nieve o de la lluvia a través de la nieve.
- **Concentrada**, a partir de aguas superficiales, cuando hay condiciones hidráulicas para que se produzca (nivel freático por debajo del nivel del agua superficial).
- **Lateral**, a partir de transferencia de agua superficial o subterránea desde áreas montañosas más lluviosas a las áreas llanas entre ellas.
- **Interacuífero**, a través de acuitardos.

En acuíferos freáticos, en condiciones climáticas normales domina la recarga difusa. Pero a medida que el clima es más árido la recarga concentrada y la lateral van ganando importancia y pueden llegar a ser dominantes en climas notablemente áridos (Magruder, 2008; Manning, 2011; Sophocleous, 2010).

La recarga es un fenómeno local o que responde a condiciones locales, incluso la difusa. Influye que el suelo sea más o menos arenoso, y que esté desnudo o cultivado, con bosque o matorral, etc. Los métodos de estudio varían entre los locales, referidos a un lugar concreto o a un área pequeña, y los regionales, en los que se busca un valor promedio en un amplio territorio (Scanlon et al., 1990). Unos hacen referencia a un evento determinado de lluvia, o los eventos en un periodo corto de tiempo, y otros se refieren a un periodo de muchos años y tienden a representar situaciones medias. Estas situaciones medias son cuasi estacionarias si no se han producido grandes cambios territoriales.

Para la recarga difusa se puede recurrir a medidas directas a través del movimiento de la humedad o de los solutos por el medio no saturado, o de trazadores artificiales, o de fluctuaciones de detalle de los niveles piezométricos –en general diarias o más frecuentes–, cuando son poco profundos (Lautz, 2008; Sophocleous, 1991). Pero su representatividad a nivel de sistema acuífero es muy pequeño y se requieren muchas mediciones en muy distintos lugares, y en todo caso representan sólo a los eventos de lluvia cuya respuesta se observa.

A nivel de sistema acuífero lo más común es realizar el balance del agua en el suelo superior, el suelo edáfico, que es donde están las raíces de las plantas y donde se produce el fenómeno de la evapotranspiración, es decir la evaporación directa del agua que se ha infiltrado en el suelo y la transpiración por las plantas (Fig. 5.3). En general este último término domina ampliamente en las situaciones más comunes en clima no demasiado árido. El balance de agua en un determinado lugar y en un cierto intervalo de tiempo, deseablemente de 1 día, puede escribirse de forma simplificada:

$$P = ES + ETR + R + \Delta H$$

P = precipitación que cae sobre el suelo, o sea después de descontar la interceptación por la vegetación y la detención superficial, que se evaporan. Se obtiene a partir de datos meteorológicos; la nieve es permeable a la lluvia y además su fusión se suma a la misma. Se obtiene como $\Delta H \cdot B$, en la que ΔH es la diferencia de humedad entre el inicio y el final del intervalo de tiempo y B el espesor del suelo edáfico.

ES = escorrentía superficial, o sea la parte de la lluvia que no se infiltra en el terreno o que habiéndose infiltrado es rápidamente descargada como arroyada local por las grietas y conductos de la parte más somera del suelo. Se obtiene por fórmulas a partir de un umbral o se deduce por el llamado método de número de curva (NRCS, 2004).

ETR = evapotranspiración real, o sea el agua que realmente se evapora del suelo y en especial la que se transpira por la vegetación.

R = agua que sale del suelo edáfico y que desciende hacia el nivel freático (recarga en tránsito).

ΔH = variación de humedad en el suelo edáfico en el periodo de tiempo considerado.

La ETR depende de la humedad del suelo y su distribución vertical. Si la superficie está seca, la evaporación se dificulta por tenerse que difundir el vapor, y en especial

porque cuando la humedad es baja las raíces limitan su captación de agua, hasta anularse en el punto de marchitez (AM). Como el suelo edáfico retiene contra la gravedad una cierta cantidad de agua, llamada capacidad de campo (CC), para un suelo de espesor B existe una reserva útil máxima de agua $RUM = (CC-PM) \cdot B$. Si la humedad real es H, la reserva útil es $RU = (H-PM) \cdot B$. Si $RU < RUM$ la planta puede empezar a sufrir estrés hídrico y tener dificultades para tomar el agua que necesita, como se comenta más adelante. Por diferencia se obtiene $R + \Delta S = \Delta S'$, que acumula los errores en los demás términos. Este error es mayor cuanto más árido es el clima.

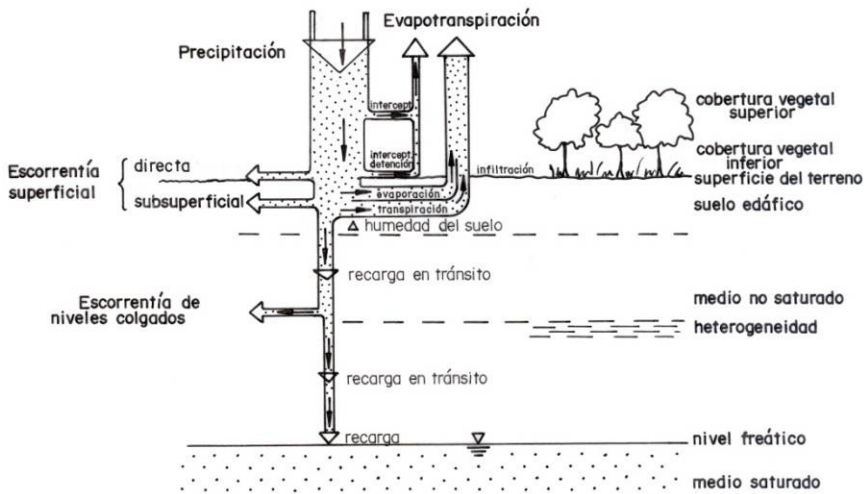


Figura 5.3: Partición de la precipitación caída sobre un lugar hasta generar la recarga. El ancho hace referencia a la cantidad de cada término. Los anchos son para un clima semiárido. Elaboración propia.

Si $\Delta H \leq RUM$ simplemente aumenta la humedad del suelo edáfico.

Si $\Delta S' \geq RUM$ el exceso se convierte en recarga en tránsito y así $R = \Delta S' - RUM$.

Así, al final de cada periodo se ha actualizado el valor de H del suelo y el proceso sigue secuencialmente hasta completar el número de años para los que se quiere hacer los cálculos. Para muchos intervalos de tiempo se hace con códigos informáticos (Samper et al., 1999).

Para obtener la ETR se parte del valor de la evapotranspiración potencial (ETP), que es la que tendría la vegetación cuando en ningún momento tuviese stress hídrico por falta o exceso de agua en la zona edáfica. La ETP depende del lugar (radiación solar), estado atmosférico, temperatura, viento y humedad atmosférica, además de la planta, pues las plantas difieren moderadamente entre sí cuando están activas. La ETP se puede calcular con los datos de estaciones meteorológicas completas o por correlación con tanques de evaporación, pero en general se calcula con fórmulas a partir de los datos del lugar y datos de las estaciones meteorológicas disponibles. La fórmula que se suele admitir que es la mejor es la de Penman-Monteith (o variantes), pero además de la radiación solar (o su cálculo geográfico) y de la temperatura requiere conocer la velocidad del viento y la humedad atmosférica. Como muchas veces sólo se dispone de las temperaturas, es frecuente utilizar la fórmula de Thornthwaite (o variantes), que suele dar valores por defecto si el clima tiende a árido, o la de Hargreaves-Samani si se dispone de la temperatura máxima y mínima. Hay muchas otras fórmulas, que se resumen en Oudin et al. (2005).

El paso de la ETP a la ETR requiere una función que exprese cómo se reduce la transpiración de la planta a medida que decrece la humedad del suelo, H . Esta función es empírica y no siempre se conoce adecuadamente.

Con todo esto se obtiene R , con un error que puede ser importante. El cálculo deber ser diario para tener en cuenta la variabilidad de la lluvia, tanto más cuanto más árido en el clima. Los balances mensuales, como a veces se hacen en agronomía, dan valores de R por defecto, a veces muy por defecto, ya que no consideran la gran importancia de los eventos intensos de lluvia.

El valor de R , recarga en tránsito, se transporta por el medio no saturado (percolación) hasta el nivel freático, aunque en ocasiones una parte puede descargarse lateralmente a partir de acuíferos colgados temporales. Cuanto más profundo es el nivel freático más diferida y más amortiguada es la recarga que llega al acuífero, que es el valor de interés y el que produce las fluctuaciones de nivel y las descargas del acuífero. El retraso en la respuesta hidráulica puede variar entre días y meses, a veces años, pero el agua que se recarga no es la de la recarga en tránsito sino parte de la que estaba almacenada en el medio vadoso o medio no saturado.

Como los valores de recarga al acuífero son inciertos, en parte por serlo los parámetros y fórmulas utilizadas, los resultados han de calibrarse, en lo posible mediante la comparación de las oscilaciones piezométricas o descargas que se calculan con las que se observan. Los programas de cálculo consideran esta posibilidad de modo simplificado, e incluso aportan algoritmos de ajuste automático de parámetros, que

son útiles si los parámetros a ajustar son pocos (Samper et al., 1999). Los valores de la recarga se pueden calibrar también en los modelos de simulación del flujo del acuífero.

La suma de las recargas diarias dan las recargas mensuales y las anuales. De un largo periodo se pueden deducir valores medios.

En climas húmedos y subhúmedos es posible encontrar relaciones lineales aproximadas entre recarga anual y precipitación anual, del tipo $R=\alpha(P-PO)$, en la que α es un coeficiente menor que 1 y P_o una precipitación umbral. Pero cuanto más árido es el clima más se deteriora la posible relación lineal.

En áreas regadas es posible utilizar la misma técnica para calcular la recarga sumando a la lluvia el agua de riego.

Un método alternativo independiente para obtener la recarga media anual es el balance de cloruros de deposición atmosférica, si se dispone de datos para ello (Eriksson y Khunakasem, 1969; Custodio, 2010b). El balance multianual estacionario se puede escribir en valores medios anuales:

- $R \cdot C_{IR} = A_p + A_{ES}$
- R = recarga media
- C_{IR} = contenido medio en cloruros del agua de recarga
- A_p = deposición atmosférica de cloruro
- A_{ES} = salida de cloruros con la escorrentía superficial
- CLR se puede medir a partir de pequeños manantiales colgados locales o del muestreo de la parte superior del acuífero freático, suponiendo que el flujo de percolación es relativamente rápido; en climas áridos y con nivel freático profundo el agua de recarga al acuífero puede diferir de la recarga en tránsito (Edmunds et al., 1988)
- Si el dato de AP no está disponible, se requiere una estación de muestreo de agua de lluvia (deposición húmeda + seca) durante un largo tiempo. En Canarias AP varía entre 5–6 mg m⁻²a⁻¹ en las cumbres de las islas altas hasta 10–11 mg m⁻²a⁻¹ en áreas costeras

- A_{ES} se suele calcular como la escorrentía directa media multiplicada por el contenido medio en cloruros

A escala de cuenca o de área grande, los resultados son buenos, siempre y cuando los datos de partida sean fiables (Fig. 5.4). ClR no puede medirse en grandes manantiales o pozos penetrantes o profundos, ya que en territorios con pluviometría variable ese valor CR es un valor promedio ponderado sobre todo el territorio y no el valor local (Custodio, 2010b).

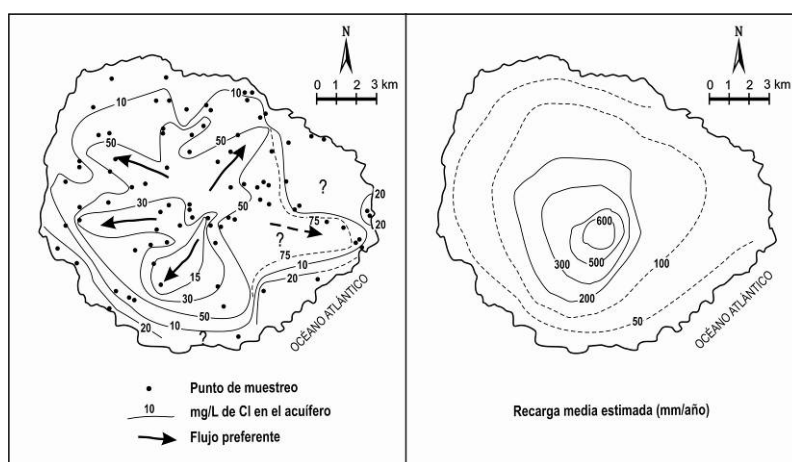


Figura 5.4; Mapa de Cl de las aguas subterráneas de La Gomera, con dominio de nacientes en cumbres y medianías, y pozos en áreas bajas. La estructura geológica es compleja, con un núcleo de baja permeabilidad que aflora y subaflora en el NW. La figura izquierda muestra la distribución de Cl, que indica que el agua de recarga fluye preferentemente por el recubrimiento volcánico menos antiguo, según las flechas. La figura de la derecha muestra la transformación de esos datos en recarga, teniendo en cuenta si son valores locales o integrados a lo largo de la ladera (Custodio, 2010a).

Las sales aportadas por la lluvia y el polvo atmosférico se quedan en la recarga, ya que el agua que se evapotranspira es vapor, libre de sales. Así, los iones conservativos, descontando la salida como escorrentía, se concentran –evapoconcentración–, de modo que la recarga es más salina, en una proporción P/R si se puede admitir que $ES=0$. En clima árido P/R puede valer 50 o más, con lo que el agua de recarga resulta más concentrada en sales; puede llegar a ser salobre en áreas próximas al mar, donde además A_p suele ser más alto. Es el efecto climático en la salinidad del agua de recarga.

La recarga concentrada es muy difícil de evaluar, debido a la frecuente gran irregularidad de las crecidas de los ríos y barrancos en cuanto a caudal y área inundada, y la falta de estudios. Se requiere estudios de detalle (Dahan et al., 2007; Sophocleous, 2003). Si hay estaciones de aforo se puede intentar evaluar por diferencias, pero el error propio de los aforos puede enmascarar de recarga en el caso de ríos alóctonos.

También es muy difícil calcular la recarga lateral desde áreas montañosas y en general hay que recurrir a ajustes en los procesos de modelización numérica. En estos casos los métodos hidrogeoquímicos e isotópicos ambientales pueden ser muy útiles.

8. Evaluación de las descargas

Contra lo que frecuentemente se cree, la evaluación de las descargas de los acuíferos es también difícil e incierta. Estas descargas pueden ser:

- **Manantiales (nacientes).** Son aforables si están concentrados. Si son dispersos hay que combinar aforos con evaluación de la evaporación de las áreas encharcadas o de nivel freático muy somero.
- **Ríos.** Hay que deducir el caudal de base que se genera en el área. Requiere separar la escorrentía superficial en los hidrogramas. La precisión decae mucho en el caso de ríos alóctonos.
- **Lagos y lagunas.** Hay que calcular la evaporación de agua libre considerando la superficie de agua, que es variable, y adicionar la de las plantas ribereñas.
- **Humedales y criptohumedales.** Hay que calcular la evaporación de la superficie de agua libre, que es muy variable, y la generalmente importante parte de las áreas de freatofitas, las que usan el agua subterránea cuando en el suelo edáfico ha disminuido suficientemente la reserva de humedad.
- **Extracciones.** En teoría se pueden conocer bien si hay contadores en las captaciones o se conocen las características de las bombas y las horas de funcionamiento o el consumo eléctrico. En la práctica puede ser un valor muy incierto por la falta de datos, gran dispersión de las extracciones y frecuentes informaciones falseadas. Se recurre entonces a evaluar la población abastecida y/o la superficie regada.

9. Métodos hidrogeoquímicos

La hidrogeoquímica estudia la composición química del agua, principalmente de los iones y compuestos mayoritarios y minoritarios disueltos (Appelo and Postma, 1993), con diferentes objetivos:

- 1) Explicar las características químicas del agua tanto en el medio líquido como en sus relaciones con el medio sólido y el medio gaseoso. Comprende las relaciones roca-agua.
- 2) Relacionar las características químicas con los modelos conceptuales de flujo y transporte en los sistemas acuíferos y ayudar a mejorarlos y contrastarlos.
- 3) Mejorar el conocimiento de los parámetros hidráulicos y de transporte.
- 4) Conocer cómo afectan las acciones antrópicas a la composición del agua.
- 5) Conocer la génesis de minerales en relación con el agua.

Los aspectos de calidad del agua subterránea, aunque muy relacionados con la hidrogeoquímica, no entran dentro de este ámbito. La hidrogeoquímica es una poderosa herramienta hidrogeológica, complementaria en muchos aspectos a los otros métodos, pero que debe enmarcarse en el contexto hidrogeológico y en los modelos conceptuales de funcionamiento. Requiere un razonable conocimiento hidroquímico. Se busca interpretaciones de procesos y mecanismos y no descripciones, las que aportan poco o nada.

Los métodos utilizables son numerosos (véase Custodio y Llamas, 1976, Sec. 10; CIHS, 2009), y pueden combinarse de diferentes maneras, todo ello en función de las peculiaridades de cada caso y de los objetivos perseguidos. Hace falta cierta experiencia y saber lo que se busca. No hay reglas fijas ni métodos generales. No tiene sentido aplicarlo todo pues sólo se consigue desdibujar los caminos, con un esfuerzo excesivo, no útil.

Se puede analizar un único componente, conservativo o no, según convenga, o varios de ellos, o todo el conjunto, o relaciones entre componentes para eliminar efectos que afecten de la misma manera, o resaltar otros, según convenga. También se pueden usar valores obtenidos por cálculo tales como la presión parcial de CO_2 de equilibrio o los índices de saturación respecto a minerales de interés, a ser posible con la

ayuda de códigos de cálculo con una buena base fisicoquímica, como el PHREEQC, pero para primeras aproximaciones también son válidos los cálculos más sencillos.

Se puede trabajar mediante mapas de un componente (Fig. 5.5), una relación o un valor calculado, o dibujar en el mapa varios componentes con ayuda de diagramas, como el de Stiff modificado (Fig. 5.6). En este caso se pueden clasificar los valores o llegar a trazar isolíneas o zonas si hay suficiente densidad de datos, con cuidado de que representen a una misma unidad acuífera y se tenga en cuenta que pueden haber variaciones verticales, como en acuíferos costeros o con aguas salinas subyacentes. En ocasiones las representaciones pueden hacerse mediante secciones verticales si los puntos de agua están o se pueden proyectar sobre ellas.

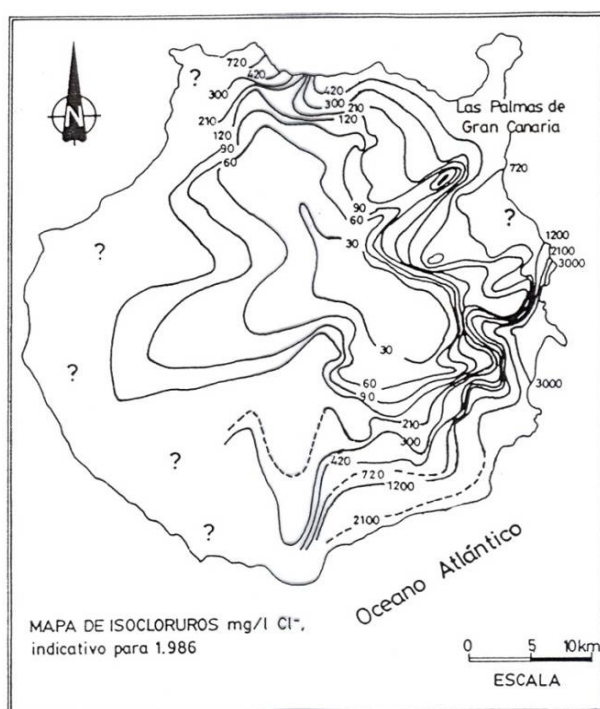


Figura 5.5; Mapa de contenido en cloruros en las aguas subterráneas de Gran Canaria mediante isolíneas, allí donde la densidad de puntos es suficiente. Son predominantemente pozos con penetración parcial. La regularidad de las curvas indica continuidad de flujo de cumbre a costa. Cuando están muy apretadas delatan la presencia de una barrera de baja permeabilidad (borde de caldera) que en estado natural hacía surgir nacientes importantes cuyas aguas se encauzaban por barrancos. Existe un notable efecto de aridez climática en el SE. Elaboración de E. Custodio.

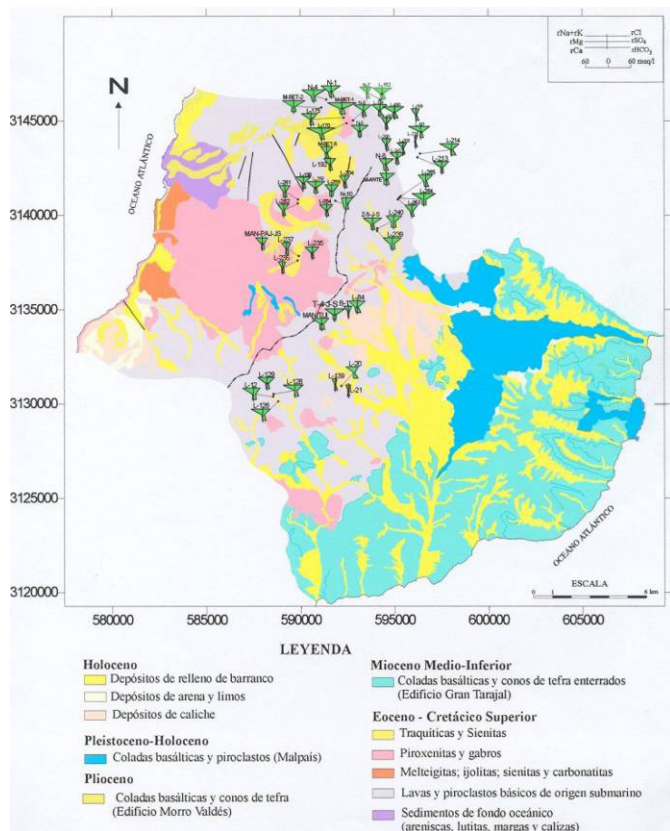


Figura 5.6; Representación de los diagramas de Stiff modificados para las muestras más representativas de la Unidad Volcánica Superior del Macizo de Betancuria, centro de Fuerteventura. Ver la escala química. Las aguas subterráneas están dominadas por la salinidad marina atmosférica, a la que se suma el Na liberado por meteorización de la roca del suelo. Datos de la tesis de C. Herrera.

Para comparar los componentes mayoritarios de los análisis químicos de un mismo punto se pueden emplear gráficos de columnas verticales logarítmicas, en un cierto orden y sólo para los iones importantes, como los de Schoeller-Berkaloff (Fig. 5.7). Son muy útiles para ver la coherencia analítica y la posible evolución, que después se puede comprobar con hidrogramas químicos, además de apreciar relaciones iónicas importantes. También permiten comparar muestras de varios puntos para ver relaciones, quizás no más de 10-15 análisis, seleccionando previamente los puntos para hacer resaltar resultados de interés.

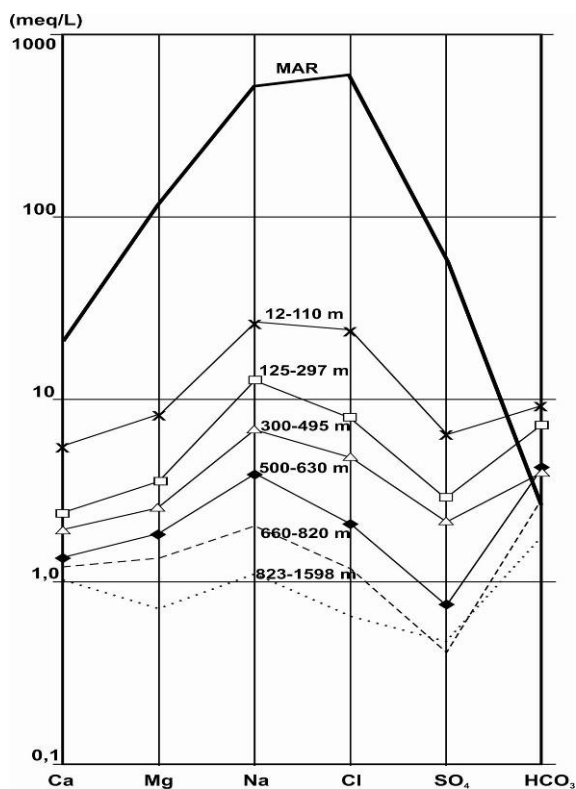


Figura 5.7: Diagrama de columnas verticales logarítmicas (Schoeller-Berkaloff) de aguas de pozos representativas de diferentes altitudes a lo largo de la cuenca del Guinguada, NE de Gran Canaria. Se indican los intervalos de alturas. De cumbre a costa la salinidad aumenta por efecto de mezclas de aguas de recarga cada vez más salinas por efecto climático con aguas procedentes de mayores altitudes. Datos de G. Naranjo y O. Lozano.

Los diagramas que reducen un análisis a un punto, con valores porcentuales, permiten comparar muchos puntos y conjuntos de análisis, pero se pierde la información sobre el contenido iónico total, y los resultados finales pueden tener poco interés interpretativo, salvo que estén bien diseñados. Tales son los diagramas triangulares de Piper o los de Durov.

De la comparación de dos iones, de una relación o valor con un ión o de dos relaciones o valores (Fig. 5.8) se puede derivar mucha información útil en hidrogeoquímica e hidrogeología. Son los diagramas llamados de dispersión. Su interpretación requiere cierto cuidado para no obtener resultados simplemente banales o errados.

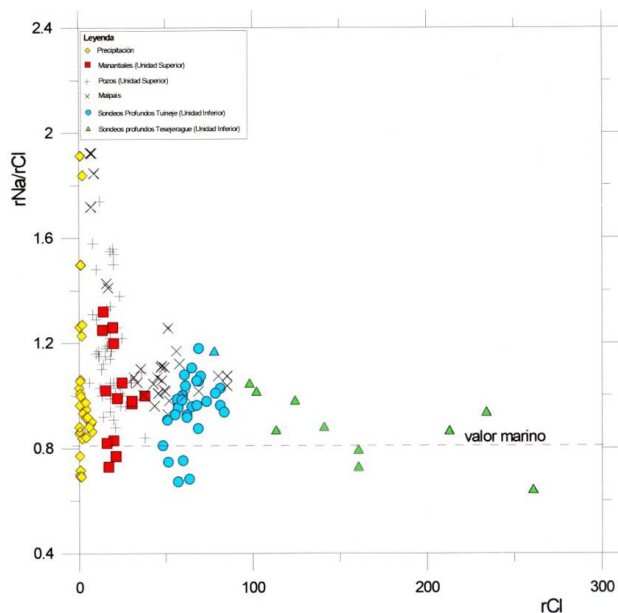


Figura 5.8: Relación entre la relación rNa/rCl en función de rCl ($r=meq/L$) para el área del Macizo de Betancuria, centro de Fuerteventura. Se busca la caracterización de la evolución del exceso de Na sobre Cl. Las aguas menos salinas tienen un efecto litológico (meteorización de basaltos alcalinos) dominante; a mayor salinidad domina el efecto de evapoconcentración del agua de lluvia, en un ambiente atmosférico salino por proximidad de la costa. Datos de la tesis C. Herrera.

Hay una muy alta gama de posibilidades, pero sólo unas pocas pueden ser útiles en un caso determinado.

Para manejar a la vez un conjunto de datos analíticos de varios componentes hay que recurrir a técnicas estadísticas de componentes principales o de agrupamientos (clusters), pero la interpretación muchas veces no es clara a menos que se sepa lo que se busca.

La distribución estadística simple o acumulada de series de componentes, relaciones o valores puede dar una información útil y cuantitativa sobre la población o poblaciones representadas (Fig. 5.9). Lo mismo puede decirse de los gráficos por localidad o en el mapa, de diagramas de cajas (box and whiskers), en los que se representan la mediana de los valores, sus cuartiles y los valores anómalos. Sirven para analizar las series de los diferentes componentes, sin límite de número, o comparar la misma variable en un conjunto de puntos. Pero se requiere una clasificación previa para que sean posible hacer comparaciones válidas. Con frecuencia puede ser necesario que la escala de valores sea logarítmica.

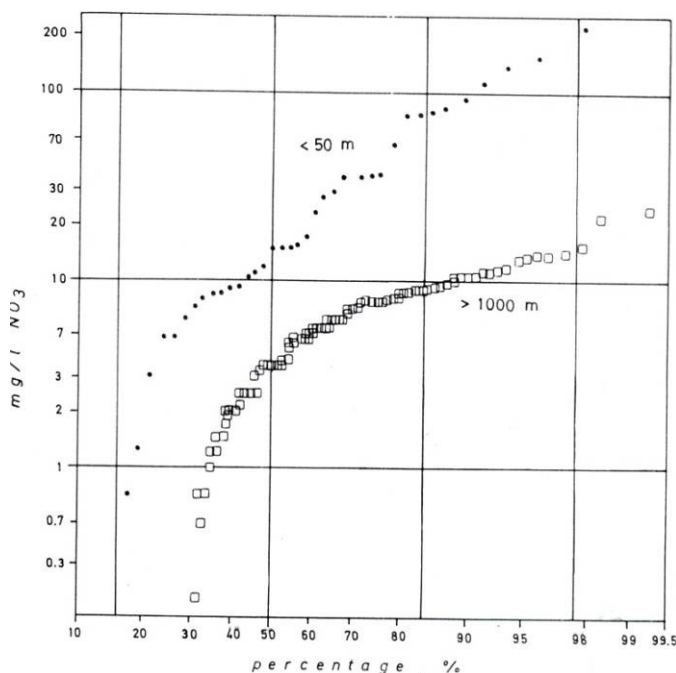


Figura 5.9: Gráfico estadístico acumulativo del contenido en nitrato en función de la frecuencia con que se presenta en nacientes, galerías y pozos de Tenerife, en áreas por encima de 1000 m y por debajo de 50 m. Hay un claro aporte antrópico de NO_3 en áreas bajas (cultivos, población) respecto a las altas, a pesar de que allí se pueden encontrar algunos valores altos por contaminación local y en especial natural debido a vegetación de clima árido. Datos de E. Custodio.

Es imposible cubrir brevemente las diversas posibilidades y casuísticas. Pero es importante recordar que lo que se busca no es describir sino interpretar, y para interpretar hay que tener unas líneas maestras derivadas del modelo conceptual de funcionamiento. Empezando por ahí es cuando surgen resultados y se detectan modificaciones que hay que introducir en ese modelo. Además se requiere una aproximación cuantitativa, en general en relación a la verosimilitud de resultados de balances y de velocidades de transferencia de masa.

La identificación del origen de salmueras es con frecuencia difícil y controvertida, pero la composición química puede ayudar a identificar si es agua marina residual, restos de una cuenca de alta evaporación o disolución de evaporitas. Para ello se utiliza la relación Cl/Br , muy característica para el agua del mar y más alta para la disolución de halita ya que el Br está casi ausente en rocas formadas por este mineral (sal común).

10. Métodos isotópicos ambientales

Los métodos isotópicos ambientales se pueden considerar como una extensión de la hidrogeoquímica. Muchos de esos métodos son actualmente convencionales, tanto en la interpretación como en la posibilidad de su determinación. Véase Clark y Fritz (1997); Mook (2002); Mazor (2004); Gat y Gonfiantini (1981). Aunque el campo es muy amplio, en la práctica sólo algunos métodos isotópicos ambientales son de uso común en la práctica. La interpretación, como sucede con los componentes del agua, además de los conocimientos específicos necesarios hay que hacerla en el contexto de un modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico, y con objetivos definidos. De otro modo puede ser un malgasto de tiempo y recursos económicos. Hay dos grandes grupos de técnicas según se trate de isótopos estables o isótopos radioactivos.

La relación isotópica es el cociente entre el número de átomos del isótopo menos abundante (en general el de mayor peso atómico), respecto al más abundante. Pero la forma más común de expresarlo es mediante la desviación isotópica $\delta = (R_m - R_s) / R_s$, siendo R la relación isotópica, m de la muestra y s de un estándar universal para cada especie isotópica. Por comodidad δ se suele expresar multiplicado por 1000, o sea en ‰. Si δ aumenta se dice que el elemento se hace isotópicamente más pesado y si disminuye que se aligera.

Las técnicas de isótopos estables, o los que se comportan como si lo fuesen, tienen aspectos diferenciados si el fraccionamiento isotópico que produce las variaciones tiene causas físicas (por ejemplo los isótopos estables del agua, C, B y Cl), donde son esos los procesos a identificar (temperatura, difusión), de los que se producen por procesos físico-químicos, en general asociados a la velocidad de reacción química y a cambios redox, para los que el objetivo puede ser el de caracterizar procesos químicos.

La técnica más importante es la que se relaciona con los isótopos del agua, $^2\text{H}/^1\text{H}$ y $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, para caracterizar el origen y evolución del agua (Fig. 10). En la evaporación-condensación hay una relación entre ambas relaciones isotópicas dada por una ecuación del tipo $\delta^2\text{H} = m\delta^{18}\text{O} + d'$. A temperatura ambiente atmosférica normalmente es $m=8$ y d' es entonces lo que se denomina exceso de deuterio (d); $d=+10\text{‰}$ para las aguas meteóricas mundiales, pero según el ambiente de generación del vapor y su transporte continental d puede ser mayor, hasta $+22\text{‰}$. En el entorno de Canarias vale entre $+16\text{‰}$ y $+20\text{‰}$. La posición de las aguas subterráneas dentro de

esa recta depende de la temperatura media del lugar en que se produce la recarga, y por lo tanto de la altitud.

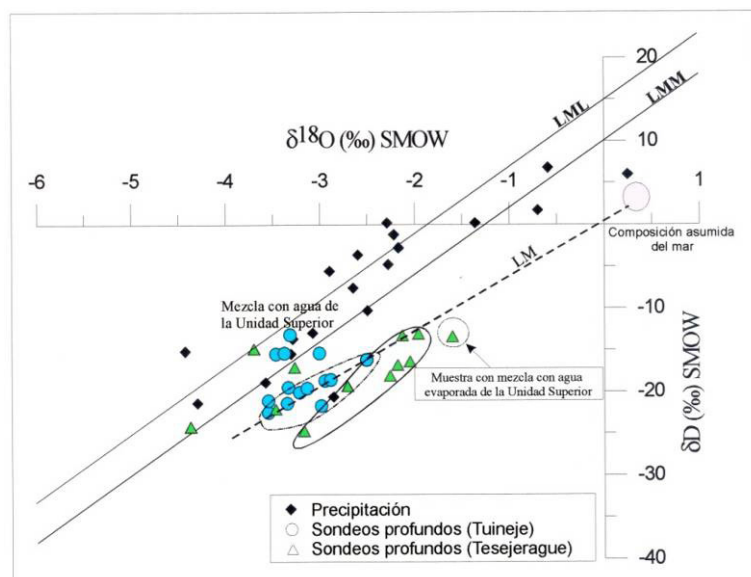


Figura 5.10; Composición isotópica ($^{18}\text{O}/^{2}\text{H}$) correspondiente a la precipitación y aguas subterráneas área del Macizo de Betancuria, centro de Fuerteventura. La precipitación se adapta a un exceso de deuterio de +20‰, excepto para las muy pesadas, por evaporación en caída. Se muestra también la recta media mundial de $d=+10$ ‰. Algunos de los sondeos (pozos) profundos están recargados por la precipitación local, mientras que otros muestran procesos de evaporación en la recarga, según una recta de pendiente $m=6,7$ y los de un tercer grupo están desplazados hacia la derecha por posibles efectos geotérmicos antiguos y cuyas aguas originales parecen responder a unas condiciones climáticas diferentes a las actuales. Datos de la tesis de C. Herrera.

Esta relación $\delta^{18}\text{O}$ ó $\delta^2\text{H}$ con la altura de recarga (Fig. 5.11) se mantiene en la circulación por el acuífero; eso delata su origen si no hay mezclas o éstas pueden ser caracterizadas. La lluvia puede estar afectada por procesos evaporativos de no equilibrio, con $m < 8$ y disminución del valor de d . La evapotranspiración de las plantas no afecta a los valores isotópicos del agua de lluvia que se infiltra, pero en zonas desnudas o poco vegetadas, como en las áreas áridas, hay un fraccionamiento no de equilibrio por difusión del vapor en el suelo que hace que $m < 8$, en general entre 2,5 y 5, que marca la escasa recarga que se pueda producir, o delata la recarga preferente no fraccionada en eventos intensos, si eso sucede. La evaporación de cuerpos de agua libre (lagos, embalses, ríos de flujo lento) también hace que $m < 8$, en general entre 4 y 6, y eso ayuda a identificar las descargas de agua subterránea a esos cuerpos, o bien si hay recarga de esa agua superficial y cómo se mezcla con el agua subterránea

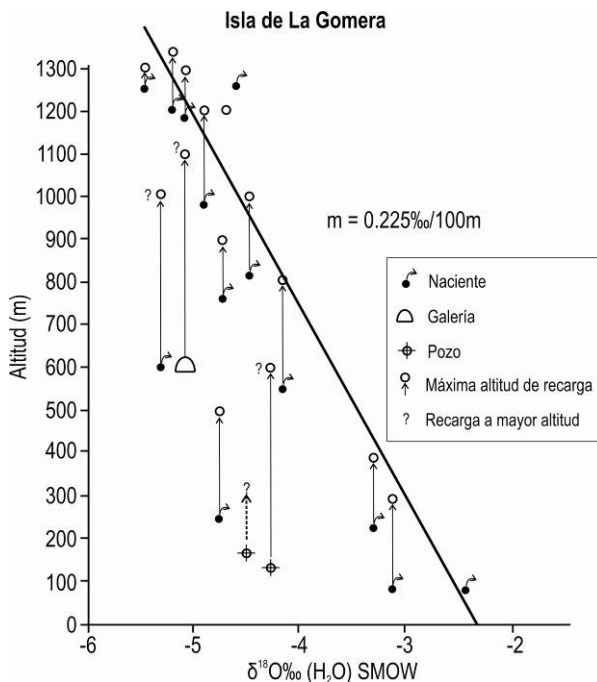


Figura 5.11; Relación $\delta^{18}\text{O}$ -altitud para la Isla de La Gomera. La línea altitudinal se ha dibujado con nacientes que tienen un área de recarga de altitud poco diferente de la de descarga. Se puede ver que el agua de algunos puntos de agua en áreas bajas y medias en realidad proceden de mayor altura; se puede cuantificar la altitud media del área de recarga (datos de Custodio, Manzano y Martínez).

A pesar de que el agua marina tiene valores isotópicos muy próximos a 0‰, ya que su valor medio se toma como estándar, la mezcla con el agua subterránea no muestra líneas de mezcla claramente diferenciadas, excepto si las aguas subterráneas son originariamente relativamente pesadas (por ejemplo $\delta^{18}\text{O} > -5\text{‰}$).

A temperatura elevada el ^{18}O del agua y de los minerales del terreno intercambian isotópicamente, y eso se refleja en el agua que ha estado sometida un tiempo largo a ambientes calientes o es un residuo de evaporación; su composición isotópica lo delata. La generación de metano termogénico o biogénico en el terreno hace que el $\delta^2\text{H}$ del metano sea muy ligero y su oxidación posterior da lugar a aguas ligeras en ^2H .

El ^{13}C es fraccionado notablemente en el proceso de fotosíntesis en las plantas, con lo que la el $\delta^{13}\text{C}$ del CO_2 del suelo que se deriva de la oxidación de la materia orgá-

nica vegetal es mucho más ligero que el del CO_2 atmosférico, y permite distinguirlo. El proceso no es simple pues hay poco fraccionamiento isotópico entre ese CO_2 del suelo y el H_2CO_3 disuelto en el agua, pero es notable con el HCO_3^- y CO_3^{2-} ; el ión dominante depende el pH. Eso permite conocer cómo son los procesos en el suelo y si la incorporación del CO_2 se hace de forma abierta o cerrada, lo que es importante para evaluar la disolución de carbonatos y la meteorización de rocas, y para conocer el origen del carbono inorgánico disuelto en el agua. También se puede identificar la presencia de CO_2 de geogénico (de procedencia profunda y volcánica) que tiene un carbono más pesado isotópicamente.

El ^{34}S del sulfato marino ha ido variando a lo largo de la historia geológica, de modo el $\delta^{34}\text{S}$ puede ayudar a identificar el origen del SO_4 disuelto en el agua, si procede de la disolución de yeso o anhidrita. La isotopía del boro es interesante para identificar procedencias marinas o contaminantes antrópicos. La relación $^{86}\text{Sr}/^{87}\text{Sr}$ no cambia en la relación roca-agua, de modo que identifica que roca se está meteorizando o alterando, ya que es un valor que puede ser muy característico de los distintos tipos de rocas. El fraccionamiento entre el ^{37}Cl y ^{35}Cl , los dos isótopos que forman el cloro natural, que en forma de cloruro es el trazador conservativo principal en hidrogeología, es muy pequeño y no permite por ahora interpretaciones claras.

Entre los isótopos que reflejan procesos químicos, en especial los redox, están los del azufre y del nitrógeno. En las transformaciones las moléculas con isótopos pesados son algo más lentas, con lo que en el producto de la reacción hay mayor proporción de isótopo ligero (^{32}S , ^{14}N) y en el reactivo residual mayor proporción del pesado (^{34}S , ^{15}N), y lo mismo sucede al ^{18}O del oxígeno de las especies oxidadas. Eso permite estudiar procesos de oxidación de sulfuros a sulfatos y de reducción de sulfatos, así como la incorporación y reducción de NO_3^- en las aguas subterráneas. Actualmente se suele medir en la misma muestra $\delta^{34}\text{S}$ y $\delta^{18}\text{O}$ del SO_4 , y $\delta^{15}\text{N}$ y $\delta^{18}\text{O}$ del nitrato.

Los isótopos radioactivos ambientales pueden tener un uso parecido como trazadores. Pero su mayor potencial es el de asociar su transporte en el medio subterráneo con un tiempo, dado que su origen es frecuentemente atmosférico y en el terreno se van desintegrando según el tiempo de permanencia de acuerdo con su periodo radiactivo, T . T es el tiempo que tarda en reducirse a la mitad el número de átomos radioactivos presentes inicialmente. Esta interpretación se suele llamar datación, aunque el concepto no es del todo adecuado en hidrología subterránea ya que las muestras de agua son en general mezclas complejas. En todo caso se les puede asociar una “edad aparente”, que se expresa mejor como un tiempo medio de residencia, que es el que tiene significado hidrológico.

El principal radioisótopo es el tritio (^3H), que forma parte de la molécula del agua, y que tiene un periodo radioactivo de 12,54 años, que es corto pero adecuado a acuíferos con rápida renovación. El tritio tiene un origen cósmico natural, pero su contenido atmosférico se multiplicó por un millar en 1963 a causa de las repetidas pruebas atmosféricas con armas nucleares entre 1954 y 1962. En 1963 se acordó suspender esas actividades y desde entonces su contenido ha ido decayendo, hasta que actualmente se está ya de nuevo en valores próximos a los naturales. Fue un trazado masivo de las aguas subterráneas a nivel mundial, que ha sido y aún sigue siendo aprovechado eficazmente. Además de su interpretación simple en cuanto a que haya (agua postnuclear, después de 1954) o no haya tritio (agua prenuclear), se puede estudiar los tiempos de residencia a partir de modelos que usan una entrada variable, un cierto modelo de mezcla en el acuífero –en realidad se produce en buena parte en la descarga o extracción– y observaciones en el agua subterránea. Los resultados han sido muy numerosos y buenos.

Como el ^3H se desintegra a ^3He que queda disuelto en el agua, la medida del ^3H y del ^3He puede extender el método ya que $^3\text{He}+^3\text{H}$ delata el valor original. Pero mientras la técnica del tritio es muy simple, la medida del ^3He es complicada y costosa.

Para substituir al ^3H se dispone del ^{85}Kr , uno de los isótopos del gas noble Kr, de periodo parecido al del ^3H : 10,8 años. Desde 1950 se ha ido acumulando en la atmósfera a consecuencia de la industria nuclear, pero de forma no lineal. La interpretación es similar a la del tritio, pero el muestreo es mucho más complicado pues requiere desgasificar 20 a 40 L de agua. Hay pocos laboratorios donde analizarlo.

El segundo radioisótopo ambiental en importancia es el radiocarbono, ^{14}C , de 5730 años de periodo. Es muy apropiado para sistemas acuíferos de tamaño medio a moderadamente grande. Su origen es cosmogénico. La producción por las armas nucleares es irrelevante si el método se aplica a casos con largos tiempo de renovación, si no hay mezcla con aguas postnucleares. Es de difícil interpretación ya que el carbono inorgánico disuelto total (CID) en el agua tiene varios orígenes: orgánico moderno, orgánico antiguo, de carbonatos, de CO_2 geogénico y volcánico. Cómo calcular la parte del CID que es de origen moderno (el CO_2 derivado de la oxidación en el suelo de la materia vegetal reciente) es un reto hidrogeoquímico. Por eso se habla de edades aparentes. Después se realizan correcciones. A pesar de ello es y será una herramienta importante, con la condición de que la interpretación hidrogeoquímica sea cuidadosa y bien fundamentada.

Los métodos isotópicos ambientales, junto con los hidrogeoquímicos, tienen gran interés para identificar y caracterizar paleoaguas, es decir aguas antiguas de muy lenta renovación, que pudieron ser recargadas en condiciones ambientales posiblemente distintas a las actuales. Pueden ser aguas dulces, salobres, saladas y salmueras.

El $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ pueden identificar la recarga de épocas más frías y lluviosas, pero la interpretación ha de considerar también otras posibilidades, tales como eventos actuales poco frecuentes, pero muy eficaces en producir recarga, o transferencia lateral desde áreas más elevadas. El ^{14}C ayuda a asignar edades de recarga, aunque pueden tener cierta incertidumbre. En casos de muy lenta renovación puede ser de utilidad el ^{36}Cl , de 300 000 años de periodo radioactivo.

11. Métodos de trazadores artificiales

En hidrología es común identificar y cuantificar procesos mediante el uso de trazadores artificiales diversos. No es tan habitual y simple en las aguas subterráneas, ya que los tiempos involucrados suelen ser muy elevados, las dispersividades grandes, los lugares de inyección y observación muy limitados, y el concepto de línea de corriente, o trayectoria en régimen no permanente, puede ser muy difícil de definir a causa de las heterogeneidades y la tridimensionalidad del flujo. Además, el íntimo contacto entre el trazador y el terreno favorece fenómenos de retención y de difusión hacia o desde heterogeneidades de muy lenta renovación. Por esa razón, para poder obtener resultados interpretables a un coste asequible, las técnicas son en general de carácter local, para resolver problemas concretos bien delimitados, en general con trazadores conservativos. Entre esos trazadores conservativos el casi ideal es el cloruro, pero su uso está limitado por su ubicua presencia y por problemas de diferencia de densidad si se aplica a concentraciones elevadas para poder luego observarlo químicamente o conductivimétricamente. El uso del bromuro es adecuado, así como ciertos colorantes si el medio es poco reactivo (sin arcilla y sin materia orgánica). En el pasado se han usado mucho los trazadores radioactivos, pero actualmente es difícil o imposible hacerlo por limitaciones administrativas, aún cuando no haya riesgo radiológico a la población.

Las aplicaciones más comunes son la determinación de la porosidad cinemática entre un pozo de bombeo y un sondeo en el que se hace la inyección, la medida de flujos verticales en pozos y sondeos, o la velocidad de flujo por dilución en los tramos permeables de las perforaciones. También se aplican para estudiar el flujo en

el medio no saturado en experiencias de recarga natural o artificial. Una aplicación especial es la que se ha hecho, y aún se hace, en medio kárstico, para determinar conexiones entre dolinas y pozos, y los manantiales, pero hay notables fracasos e interpretaciones dudosas.

12. Métodos asociados a la calidad y la contaminación

La evaluación de la calidad del agua subterránea depende del uso a la que se la destina. Se basa en normas (legales) y recomendaciones. Las más estrictas son las que hacen referencia al uso para bebida, que se extiende a la mayor parte del agua doméstica urbana. Los detalles se encuentran en las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y las reglamentaciones de cada país o región, que en la Unión Europea tiene como substrato común las Directivas correspondientes.

En general las aguas subterráneas de baja conductividad eléctrica –dulces– son potables sin más restricciones, aunque en ocasiones su dureza o exceso de sodio pueden ser inconvenientes (Custodio, 2007). No obstante, en ciertas circunstancias puede haber un excesivo contenido en nitrato, que normalmente procede de contaminación antrópica. A veces puede haber un contenido excesivo de arsénico, cuyo origen es frecuentemente natural, aunque su presencia puede estar favorecida por cambios en el acuífero debidos a la explotación del agua subterránea. También es de origen natural el exceso de flúor en algunas aguas. El tratamiento para reducir esos componentes es relativamente costoso. Una adecuada construcción de los pozos, evitando determinados niveles del acuífero, puede aminorar el problema, pero se requiere un buen conocimiento. En otras ocasiones puede haber contenidos excesivos de hierro y manganeso, o de amonio, que se forman y disuelven cuando el medio subterráneo es reductor. Su corrección es relativamente sencilla, pero requieren instalaciones.

En general las aguas subterráneas están exentas de gérmenes patógenos y virus, salvo a veces en acuíferos someros en gravas o en roca fisurada. La contaminación que se detecta en ocasiones es debida a haber desinfectado el pozo tras su construcción o tras operaciones en su interior. También puede ser por acceso de aguas superficiales contaminadas por el espacio entre el tubo y la perforación; por esa razón debe disponerse de una buena cementación superior, además de estar la boca del pozo algo por encima del nivel general del terreno para evitar encharcamientos en su entorno.

La calidad agrícola del agua viene definida por su salinidad y por la capacidad de modificar la drenabilidad del suelo. Depende de la planta y de cómo se realiza el riego. Una elevada salinidad del agua tras su *evapoconcentración* deja un agua edáfica aún más salina, que dificulta su toma por las raíces y que además puede afectar a las funciones radicales. Un notable exceso de sodio sobre los otros cationes dispersa los aglomerados del suelo, movilizandlo la fracción arcillosa, lo que hace que el exceso de agua de riego –necesaria para lixiviar las sales– drene mal hacia abajo, el suelo se encharque y se quede sin el oxígeno que hace falta, además de exacerbarse la *evapoconcentración*. Por eso la calidad agrícola del agua se define a través de su conductividad eléctrica y de un índice que cuantifica el exceso de Na, como el índice RAS (relación de adsorción de sodio) o SAR (sodium adsorption ratio): $RAS=rNa/[1/2(rCa+rMg)]^{1/2}$, en la que r indica las concentraciones en meq/L. Además el boro en exceso es un tóxico para la planta, que afecta a las funciones foliares, y por lo tanto su concentración ha de estar limitada.

Aunque la mayor parte de las aguas subterráneas de poca y media profundidad son dulces, no siempre es así, en especial en climas áridos, donde la gran *evapoconcentración* de la precipitación llega a producir aguas salobres, tanto más cuanto más cerca de la costa. Sin embargo, en áreas continentales la recirculación de sales con el polvo atmosférico produce efectos similares, aunque aquí la mayor concentración puede corresponder al SO_4 en vez de al Cl.

En profundidad la tasa de renovación del agua subterránea es muy pequeña, por lo que pueden existir aguas salinas residuales de épocas anteriores, incluso saladas. Éstas se pueden movilizar hacia partes más someras del sistema acuífero a causa de la explotación, produciendo salinizaciones crecientes si esa explotación no se hace adecuadamente.

Una situación especialmente sensible es la de los acuíferos costeros, donde la explotación puede favorecer la entrada de agua marina al acuífero o el ascenso de las aguas salinas (más densas) que puedan ocupar la parte inferior del acuífero, o de las que están retenidas en acuitardos de origen marino reciente (Custodio y Bruggeman, 1987).

Las actividades humanas pueden dar lugar a la introducción bajo el terreno de aguas contaminadas, es decir con contenidos inconvenientes o indeseables de determinadas sustancias. Estas sustancias pueden ser desde minerales a biológicas, pasando por metales pesados, y un gran número de compuestos orgánicos (hidrocarburos, disolventes orgánicos, detergentes, plaguicidas, herbicidas, productos farmacéuticos, cosméticos, drogas,...). Es el proceso llamado de contaminación, y el hecho de introducir esas sustancias es el de polución. La polución es artificial mientras que la contaminación puede ser natural o artificial.

Unos contaminantes son conservativos, es decir se mueven de forma similar al agua, pero la mayor parte intercambian con las partículas del terreno, esencialmente con su superficie, y son intercambiados iónicamente (caso de los iones) o adsorbidos (caso de las sustancias moleculares), con lo cual su movimiento se retrasa respecto al del agua; las puntas se suavizan, pero se pueden producir largas colas de paso y salida. Esto se acentúa aún más cuando el contenido a alta concentración se difunde hacia las partes de baja permeabilidad del sistema acuífero (heterogeneidades, bloques entre fisuras), de donde vuelve a salir después, pero con gran retraso y dilución.

Según las características fisicoquímicas del contaminante y del terreno, se pueden tener factores de retraso respecto a la velocidad del agua desde 1 (conservativo) a decenas, e incluso a muchos miles, como en el caso de ciertos plaguicidas. Esto es especialmente importante para contaminantes no conservativos aplicados en superficie, que han de circular por el medio no saturado (Candela y Varela, 1993).

Por otro lado, unos contaminantes son estables, otros se modifican por procesos redox y otros se degradan o se desintegran si son radioactivos. El comportamiento de muchos de ellos en el medio subterráneo es poco conocido y además depende las condiciones redox y del pH.

El movimiento de un contaminante estable se hace a una velocidad $v = (k/m_c) i / R$ en la que k es la permeabilidad, m_c es la porosidad cinemática, i es el gradiente hidráulico y R el factor de retardo. El valor v puede variar desde decenas de m/día a una pequeña fracción de mm/día.

La contaminación puntual es la que se produce en un área de reducidas dimensiones y da origen a un penacho de contaminante que se mueve según el flujo del agua, con el correspondiente retraso y dispersándose. Es la producida por fugas, vertederos, accidentes,...

La contaminación difusa es la que se produce sobre un amplio territorio, como la debida al aire contaminado o a la agricultura extensiva. Da origen a un efecto extenso que antes de llegar al acuífero e incorporarse a su flujo debe descender por el medio no saturado. En el caso de un contaminante conservativo estable, el tiempo de paso (en flujo de pistón) por el medio no saturado se puede estimar como $\tau = B \cdot H / R$, en la que B es el espesor del medio no saturado, H es la humedad de ese medio (próxima a la capacidad de campo) y R es la recarga (natural o natural + exceso de riego). τ varía entre algunos meses a cientos de años, según los casos.

Entre los contaminantes líquidos posibles están los que son poco solubles en agua. Pueden formar una fase separada si su concentración es suficientemente elevada.

Unos flotan y se acumulan en el entorno del nivel freático, como los hidrocarburos, y otros son más densos y se hunden para acumularse en la base del acuífero o el techo de un acuitardo. Los métodos de tratamiento y regeneración de un acuífero contaminado son muy complejos y lentos, y suponen altos costes.

Para proteger las captaciones de agua potable se establecen restricciones legales sobre el territorio que limitan o prohíben actividades contaminantes en el área en el entorno y de donde proceden las líneas de corriente que lo alimentan. Estas áreas de protección vienen definidas por el perímetro de protección, cuyo diseño no siempre es sencillo. Dentro de ese perímetro hay diferentes restricciones, tanto más severas cuanto más cerca de la captación, e incluso a cuerpos de agua superficial que puedan contribuir a la recarga. Estos perímetros son un requisito legal en muchos países, pero su puesta en práctica es difícil. En general se está muy por detrás de lo deseable. Sin embargo en Alemania el 10% del territorio llano tiene restricciones de este tipo. El diseño de esos perímetros de protección en islas volcánicas requiere un buen conocimiento hidrogeológico.

El estudio de detalle del movimiento de solutos por el terreno es objeto de los modelos de transporte de masa. Requieren un detallado conocimiento del medio -del que no se suele disponer- y de parámetros que no son fáciles de obtener. El movimiento del soluto relativo al del agua se define por la Ley de Fick, que relaciona esa velocidad con el gradiente de concentración a través de un coeficiente de dispersividad, que depende de la difusividad (para flujos muy lentos) y de la dispersividad del medio. El balance en un determinado volumen representativo de terreno establece que las entradas menos las salidas más el aporte menos la destrucción es igual a la variación de la masa de soluto. Las entradas y salidas se producen con el flujo del agua (advección) y por dispersión. Es posible la resolución numérica con los códigos y modelos existentes, incluso considerando un campo de densidad no homogénea, es decir movimientos convectivos, y situaciones en 3 dimensiones.

13. Efectos de la explotación intensiva del agua subterránea

La explotación del agua subterránea es ubicua y relativamente fácil y económica, con lo que en muchas regiones se ha ido haciendo un uso cada vez mayor de la misma, para abastecimiento, y en especial para agricultura en países semiáridos y áridos. Se inició tímidamente a finales del siglo XIX, se intensificó en la primera mitad del siglo XX en el centro y oeste de los Estados Unidos, a mediados del mismo en España, México, Norte de África, Israel, Arabia, Pakistán, Australia, ... y en gran escala desde el últi-

mo tercio de ese siglo XX en India y China, entre otros (Custodio, 2010a). En Canarias el uso se inició a finales del siglo XIX, se aceleró en la década de 1930 y alcanzó un máximo en las de 1960 y 1970, con una cierta disminución desde entonces. Así se ha llegado a una explotación intensiva, es decir a extraer una fracción importante de la recarga, en ocasiones incluso más. Eso ha reportado notables beneficios y progreso económico y social. Pero se ha modificado el funcionamiento de muchos sistemas acuíferos y del ciclo hidrológico en general, con resultados negativos –externalidades– que reducen los beneficios a nivel social, ya que si el explotador no paga las deseconomías, las paga otro de alguna manera –actual o futuro; ahora se paga lo que se hizo en el pasado– o se reducen los servicios ecológicos de la Naturaleza. En buena parte es lo que comúnmente se denomina sobreexplotación, aunque es un concepto mal definido (Collin y Margat, 1993; Custodio 2002), y es más adecuado hablar de explotación intensiva (Llamas y Custodio, 2003; Sahuquillo et al., 2004).

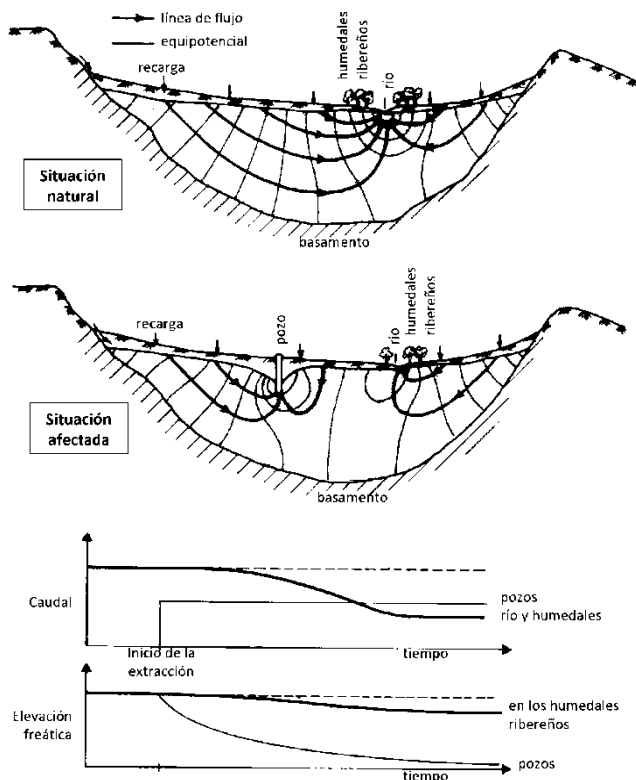


Figura 5.12: Comparación entre la situación natural en el acuífero de un valle o depresión y el resultado de su explotación, con indicación de la evolución del caudal de ríos, nacientes y humedales, y la elevación freática. La escala de tiempo puede ser de meses a cientos de años.

Esos efectos –en general negativos o deseconomías– se traducen en mermas o cese del caudal de manantiales, del caudal de base de ríos, de la extensión y nivel de lagos, lagunas, humedales –incluso su desecación–, en un descenso de niveles que encarece las extracciones, en posibles disminuciones de la calidad del agua subterránea, y en algunos casos en subsidencia del terreno –y también colapsos– por disminución de la presión del agua intersticial. Véase la figura 12. En algunos casos los efectos son positivos, como ocurre al mantener bajos los niveles freáticos en áreas urbanas con infraestructuras subterráneas (Foster et al., 2011).

Socialmente, el beneficio obtenido debería ser mayor que los costes asociados de todo tipo, pero puede que no suceda así cuando sólo se considera la economía directa del extractor. No obstante lo dicho, son raros los fracasos que han ido acompañados de serios problemas sociales, ya que la lenta evolución permite adaptaciones y mitigaciones. Pero hay tensiones sociales (Burke y Moench, 2000), lo que requiere planificación y gestión (López-Gunn et al., 2011; Sahuquillo et al., 2009), actuaciones (Sophocleous, 2010), y en definitiva gobernanza (Llamas et al., 2006). Un buen ejemplo de evolución y adaptación a una explotación del agua subterránea no sustentable es la de Canarias (Custodio y Cabrera, 2002).

Cuando la extracción supera a la recarga, se produce un permanente consumo de reservas de agua subterránea hasta su agotamiento, bien sea físico, por calidad o económico. Esta minería del agua no es sustentable a largo plazo, pero puede ser aceptable temporalmente si los beneficios se usan para el desarrollo social y la provisión de nuevos recursos de agua, o el mejor uso de las disponibles. Hay aspectos éticos y morales importantes generales (Benedicto XVI, 2009; Koenig-Bricker, 2009) y en relación específica con las aguas subterráneas (Custodio, 2009). Sin embargo, la extracción y la recarga son valores inciertos y por tanto sólo se tiene confianza que así sucede cuando la diferencia entre esos términos es grande.

14. Métodos de planificación, gestión y administración

El uso intensivo del agua subterránea, su posible contaminación –que puede llegar a ser irreversible–, las situaciones de minería del agua subterránea, los conflictos entre los usuarios de acuíferos compartidos o dentro de un mismo acuífero, las interferencias con el ciclo del agua, en especial con el superficial –y en cierto modo también el marino litoral–, las deseconomías asociadas, y otros numerosos aspectos, requieren que la explotación del agua subterránea esté sometida a regulaciones

y acuerdos. Así, se requiere disponer de normativa, un órgano legislativo y regulador, una administración que planifique y gestione y la participación de la sociedad.

Lo que es relativamente fácil para las aguas superficiales, con grandes obras y usuarios bien conocidos, y efectos visibles y a corto plazo, no lo es para las aguas subterráneas. Eso es debido a que son muchos los usuarios, en amplios territorios, sin relación clara entre ellos, los que en general desconocen lo que ellos mismos hacen y sus efectos. Esto va acompañado de repercusiones no fácilmente apreciables cuando se producen, y con efectos a medio y largo plazo.

Por lo tanto hace falta una metodología de planificación, gestión y de administración, distinta a la hasta ahora aplicada, para la que hay poca experiencia social y legislativa ya que la explotación intensiva de las aguas subterráneas es relativamente reciente, y en algunas regiones aún en sus inicios. Además los organismos existentes en general están poco preparados, desconocen las aguas subterráneas –incluso las menosprecian– y no son conscientes de la “revolución silenciosa” a la que se están enfrentando. Por esas razones los métodos de planificación, gestión y administración deberían basarse en:

- Buen conocimiento de los sistemas acuíferos, al nivel que requiere la situación real.
- Suficientes redes de observación de las variables que interesan y afectan.
- Accesibilidad pública a la información.
- Participación de los usuarios a través de representantes elegidos y eficaces, posiblemente a través de Comunidades de Usuarios de Aguas Subterráneas.
- Intervención de la Sociedad Civil para aportar la visión a medio y largo plazo, y dar estabilidad social ante vaivenes políticos.
- Administradores con autoridad reconocida, conocedoras y con visión a medio y largo plazo, con capacidad para la gestión a corto plazo. Han de modular la visión a corto plazo de muchos de los usuarios, estar libres de un exceso de influencia política y tener el apoyo de una justicia eficaz.

Un intento de gestión racional es el buscado en Europa a través de la Directiva Marco del Agua (DMA, 2000), por la vía del buen estado del medio ambiente. Sin embargo la aplicabilidad al agua subterránea no siempre es clara, por lo cual ha hecho

falta complementarla con la llamada Directiva del Agua Subterránea (DAS, 2005), y aún así hay muchos puntos débiles o de difícil puesta en práctica.

15. Consideración metodológica del cambio climático y global

El clima ha sido variable a lo largo de la historia geológica y también humana, y lo continuará siendo en función de variables exógenas. Se conoce el pasado, y las aguas subterráneas de lenta renovación guardan en parte memoria de lo sucedido. Pero la evolución futura por causas naturales es muy incierta en cuanto a temperatura, precipitación y régimen, y aspectos territoriales asociados, como la cubierta vegetal. A esta variabilidad climática se suman los efectos antrópicos. Han existido por lo menos en los últimos 5000 años, en especial en cuanto a la tala y quemado de bosques y establecimiento de grandes áreas agrícolas, pero desde mediados del siglo XIX se han intensificado, en especial desde el último tercio del siglo XX. Un importante impacto singular es el del crecimiento acelerado de los gases de efecto invernadero (CO_2 , CH_4 , NO_x ,...), que producen, a igualdad de otras circunstancias, un calentamiento progresivo. Pero el mayor contenido en polvo y humedad de la atmósfera local produce el efecto contrario, aunque es menos conocido. A este cambio climático, también incierto, se une los importantes cambios en el territorio (en el bosque, en la agricultura, en la urbanización), en el uso del agua, en la contaminación atmosférica y en la dinámica marina y de las grandes masas de agua. Es el cambio global.

Cabe esperar que en el futuro cambie la precipitación, en cantidad y régimen, y la temperatura, y la cubierta vegetal evolucione lentamente para adaptarse. Así se modificará la recarga a los acuíferos y quizás su funcionamiento. Con los métodos existentes se puede calcular como se puede modificar esa recarga, y su efecto se puede modelar si se suministran las series de datos necesarios. La cuestión esencial es la obtención de esas series de forma que representen situaciones futuras creíbles y probables. Para los cálculos posteriores en principio basta con los métodos disponibles, aunque no del todo pues además influyen otros aspectos como la escorrentía superficial y las nuevas acciones antrópicas evolutivas, de adaptación y mitigación que afecten al acuífero y su entorno, entre ellas la planificación y gestión del uso del propio acuífero.

Cada conjunto de datos es un escenario. No es algo que tenga suceder, sino sólo algo plausible dentro de un muy amplio conjunto de posibilidades. Un estudio re-

quiere probar diversos escenarios. Es muy difícil establecer cuan realistas son los escenarios que se utilizan, e intrínsecamente incierto.

Para llegar a configurar un escenario, con su conjunto de datos en cuanto al cambio climático, se parte de los modelos de circulación general atmosférico, que proporcionan resultados en una malla de 100 a 500 km de lado. Para el acuífero se requiere mayor detalle territorial, a la escala de 5 a 20 km, según los casos, y eso se hace con un proceso de detallado (downscaling). Este proceso parte de los datos generales, los transforma en locales, bien sea buscando factores de correlación con las series históricas (downscaling estadístico), que supone que esas correlaciones no cambiarán en el futuro, o bien se simula el clima local tomando como condiciones de contorno los resultados de los modelos de circulación general (downscaling dinámico). Esto conlleva un aumento de la incertidumbre. A todo ello hay que sumar las intervenciones antrópicas.

Bibliografía consultada y referencias

- APPELO, C.A.J. & POSTMA, D. (1993). *Geochemistry, groundwater and pollution*. Balkema, Rotterdam: 1-536.
- BENEDICTO XVI (2009). *Carta encíclica Caritas en Veritate*. Vaticano, Roma, de 29 de junio.
- BURKE, J.J. & MOENCH, M. (2000). *Groundwater and society, resources, tensions and opportunities*. Themes in Groundwater Management for the 21st Century. United Nations, New York: 1-170.
- CANDELA, L. y VARELA, M. (1993). *La zona no saturada y la contaminación de las aguas subterráneas*. CIMNE-UPC. Barcelona.
- CIHS (2009). *Hidrogeología*. Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea. Barcelona: 1-768.
- CLARK, I. & FRITZ, P. (1997). *Environmental isotopes in hydrogeology*. CRC Press: 1-328.
- COLLIN, J.J. & MARGAT, J. (1993). *Overexploitation of water resources: overreaction or an economic reality?*. Hydroplus, 36: 26-37.
- CUSTODIO, E. (2001). *Effects of groundwater development on the environment*. Boletín Geológico y Minero. Madrid: 111(6): 107-120.
- CUSTODIO, E. (2002). *Aquifer overexploitation, what does it mean?*. Hydrogeology Journal, 10(2): 254-277.
- CUSTODIO, E. (2005). *Groundwater as a key water resource*. Water Mining and Environment: Book Homage to Rafael Fernández Rubio. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid: 63-78.
- CUSTODIO, E. (2007). *Groundwater protection and contamination*. In Ragone et al., The Global Importance of Groundwater in the 21st Century. Proc. Intern. Symp. on Groundwater Sustainability. National Ground Water Association Press, Westerville, OH: Sect 4: 219-231.
- CUSTODIO, E. (2009). *Aspectos éticos de la dominada crisis del agua*. En M.R. Llamas, Implicaciones Éticas en Algunos Debates Científicos. Instituto de España, Madrid: 91-114.
- CUSTODIO, E. (2010a). *Intensive groundwater development: A water cycle transformation, a social revolution, a management challenge*. In Martínez-Cortina et al., Rethinking Water and Food Security. Chap. 14, CRC Press: 259-298.

- CUSTODIO, E. (2010b). *Estimation of aquifer recharge by means of atmospheric chloride deposition balance*. Contributions to Science 6(1): 81-97.
- CUSTODIO, E. & BRUGGEMAN, G.A. (1987). *Groundwater problems in coastal areas*. Studies and Reports in Hydrology 45, UNESCO, Paris: 1-576.
- CUSTODIO, E. & CABRERA, M.C. (2002). *¿Cómo convivir con la escasez de agua?. El caso de Canarias*. Bol. Geológico y Minero, Madrid, 113(3): 243-258.
- CUSTODIO, E. & CARDOSO DA SILVA JR., G. (2008). *Conceptos básicos sobre o papel ambiental das águas subterrâneas e os efeitos da sua exploração*. Bol. Geológico y Minero, 119(1): 93-106.
- CUSTODIO, E. y LLAMAS, M.R. (1976). *Hidrología subterránea*. Ediciones Omega. Barcelona. 2 Vols: 1-2350. (reedición 1983).
- CUSTODIO, E.; LLAMAS, M.R. y SAMPER, J. (eds.) (1997). *Evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrográfica*. Grupo Español de la AIH / ITGE, Madrid: 1-455.
- DAHAN, U.; SHANI, Y.; ENZEL, Y.; YECHIELI, Y. & YAKIREVICH, A. (2007). *Direct measurements of floodwater infiltration into shallow alluvial aquifers*. Journal of Hydrology, 344: 157-170.
- DAS (2006). *Directiva del Agua Subterránea, Directiva 2006/118/EC sobre protección del agua subterránea contra la polución y el deterioro*. Comisión Europea. Bruselas.
- DELLEUR, J.W. (ed.) (2007). *The handbook of groundwater engineering (2nd edition)*. CRC. Press: approx. 1200 pp.
- DE MARSILY, G. (1986). *Quantitative hydrogeology: groundwater hydrology for engineers*. Academic Press: 1-440.
- DE VRIES, J.J. & SIMMERS, I. (2002). *Groundwater recharge: an overview of processes and challenges*. Hydrogeology Journal 10(1): 5-17.
- DMA (2000). *Directiva Marco del Agua, Directiva 2000/60/CE para establecer un marco comunitario para la actuación en política de agua*. Comisión Europea. Bruselas.
- EDMUNDS, W.M.; DARLING, W.G. & KINNIBURGH, D.G. (1988). *Solute profile techniques for recharge estimation in semi-arid and arid terrain*. In: Simmers, I. Estimation of Natural Groundwater Recharge, Reidel Publishing Co. Higham, MA. 139-157.
- ERIKSSON, E. & KHUNAKASEM, V. (1969). *Chloride concentrations in groundwater, recharge rate and rate of deposition of chloride in the Israel coastal plain*. Journal of Hydrology 7(2): 178-197.
- FREEZE, R.A. & CHERRY, J.A. (1979). *Groundwater*. Prentice Hall: 1-604.
- FOSTER, S.D.; HIRATA, R. & HOWARD, K.W.F. (2011). *Groundwater use in developing cities: policy issues arising from current trends*. Hydrogeology Journal, 19: 271-274.
- GAT, J. & GONFIANTINI, R. (1981). *Stable isotope hydrology: deuterium and oxygen-18 in the water cycle*. International Atomic Energy Agency, Vienna. Technical Reports Series nº 210, 339 pp.
- KOENIG-BRICKER, W. (2009). *Ten commandments for the environment*. Pope Benedict XVI speaks out for creation and justice. Ave Maria Press, Note Dame, Indiana: 1-152.
- LAUTZ, L.K. (2008). *Estimating groundwater evapotranspiration rates using diurnal water-table fluctuations in a semi-arid riparian zone*. Hydrogeology Journal, 16: 483-497.
- LERNER, D.N.; ISSAR, A.S. & SIMMERS, I. (1990). *Groundwater recharge*. A guide to understanding and estimating natural recharge. IAH International Contributions to Hydrogeology. Vol. 8. Heise. Hannover. 345 pp.
- LLAMAS, M.R.; FORNÉS, J.; HERNÁNDEZ-MORA, N. y MARTINEZ CORTINA, L. (2001). *Aguas subterráneas: retos y oportunidades*. Mundi-Prensa / Fundación Marcelino Botín, Madrid: 1-529.
- LLAMAS, M.R. & CUSTODIO, E. (ed.) (2003). *Intensive use of groundwater: challenges and opportunities*. Balkema, Lisse: 1-478.
- LLAMAS, M.R.; MUKHERJI, A. & SHAH, T. (eds.) (2006). *Social and economic aspects of groundwater governance*. Hydrogeology Journal, 14(3): 269-432.

- LÓPEZ-GUNN, E.; LLAMAS, M.R.; GARRIDO, A. & SÁNZ, D. (2011). *Groundwater management*. Treatise on Water Science. Elsevier: 91–127.
- MAGRUDER, I.A.; WOESSNER, W.W. & RUNNING, S.W. (2008). *Ecohydrologic process modeling of mountain block groundwater recharge*. GroundWater, 47(6): 774–785.
- MANNING, A.H. (2011). *Mountain–block recharge, present and past, in the eastern Española Basin, New Mexico, USA*. Hydrogeology Journal, 19: 379–397.
- MAZOR, E. (2004). *Chemical and isotopic groundwater hydrology*. M. Dekker Inc.: 1–449.
- MOOK, W.G. (2002). *Isótopos ambientales en el ciclo hidrológico: principios y aplicaciones* (Trad. P. Ramajo y E. Custodio). Instituto Geológico y Minero de España. Madrid: 1–596.
- NRCS (2004). *National engineering handbook*, Part 630: Hydrology, Chap. 10. National Resources Conservation Service. http://policy.nrcs.usda.gov/scripts/epsiiis.dll/H/H_210-630-10.pdf
- LOUDIN, L.; HEVIEU, F.; MICHEL, C.; PERRIN, C.; ANDRÉASSIAN, V.; ANCTIL, F. & LOUMANGE, C. (2005). *Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model ?*. Part 1– Can rainfall–runoff models efficiently handle detailed potential evapotranspiration inputs ? Part 2– Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall–runoff modelling. Journal of Hydrology, 303: 275–289; 290–289.
- PRICE, M. (2004). *Introducing groundwater*. Routledge, UK: 1–304.
- RAGONE, S.E.; DE LA HERA, A. & HERNÁNDEZ-MORA, N. (2006). *The global importance of groundwater in the 21st century*. Proceedings of the International Symposium on Groundwater Sustainability, Alacant / Alicante 2006. Nat. Ground Water Association Press, Westerville, OH: 1–382.
- SAHUQUILLO, A.; CAPILLA, J.; MARTÍNEZ-CORTINA, L. & SÁNCHEZ-VILA, X. (eds.) (2004). *Groundwater intensive use*. International Association of Hydrogeologists, Selected Papers 7, Balkema, Leiden: 1–393.
- SAHUQUILLO, A.; CUSTODIO, E. & LLAMAS, M.R. (2009). *La gestión de las aguas subterráneas*. Tecnología del Agua, 305: 60–67; 306: 54–67.
- SAMPER, J.; HUGUET, LL.; ARÉS, J. y GARCÍA, M.A. (1999). *Visual BALAN V1.0. Manual del usuario del programa, código interactivo para la realización de balances hidrológicos y la estimación de la recarga*. ENRESA, Publ. Tec. 05/99. Madrid.
- SCANLON, B.R.; HEALY, R.W. & COOK, P.G. (2002). *Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge*. Hydrogeology Journal 10(1): 18–39.
- SCHWARTZ, F.Q. & ZHANG, H. (2003). *Fundamentals of groundwater*. Wiley: 1–583.
- SIMMERS, I. (ed.) (1997). *Recharge of phreatic aquifers in (semi-) arid areas*. International Assoc. Hydrogeologists no. 19. Balkema, Rotterdam: 1–277.
- SOPHOCLEOUS, M. (1991). *Combining the soilwater balance and water-level fluctuation methods to estimate natural groundwater recharge: Practical aspects*. Journal of Hydrology, 124: 229–241.
- SOPHOCLEOUS, M. (2003). *Interaction between groundwater and surface water: the state of the art*. Hydrogeology Journal, 10: 52–67.
- SOPHOCLEOUS, M. (2010). *Review: groundwater management practices, challenges, and innovations in the High Plains aquifer, USA—lessons and recommendations*. Hydrogeology Journal, 18(3): 559–575.
- YOUNGER, P.L. (2007). *Groundwater in the environment: an introduction*. Blackwell Publ.: 1–318.



Hidrología superficial en islas y terrenos volcánicos

Juan Carlos Santamarta Cerezal

1. Introducción

La naturaleza geológica y climática de la islas volcánicas, con escasa pluviometría y elevada presión sobre los recursos hídricos, no favorece la existencia de aguas superficiales permanentes en forma de ríos o lagos continentales. Sin embargo, en otros sistemas insulares volcánicos, con unas pluviometrías más elevadas y la existencia de terrenos impermeables, pueden dar lugar a lagos como en el caso del archipiélago de Azores (Terceira, San Miguel...) o incluso tener ríos o arroyos continuos durante todo el año. Canarias, aunque existieron hace del orden de 100 años, actualmente no existen lagos ni lagunas - a excepción de los formados en Gran Canaria por las presas- y, el único cauce con cierta continuidad es el del barranco de Las Angustias en la Palma, cuyo aprovechamiento mediante un embalse siempre ha sido objeto de estudio y debate.

Por otro lado las manifestaciones superficiales de la actividad volcánica en las Islas Canarias involucran una gran variedad de procesos singulares, resultado de la evolución y progreso de complejos magmáticos emplazados en distintos contextos tectónicos, de la interacción del agua con la hidrología e hidroquímica superficial y sub-superficial.

Otro problema en relación a la hidrología superficial es que, en general, las islas volcánicas están en progresivo desmantelamiento mediante procesos erosivos, provocados principalmente por la erosión hídrica y en menor medida por la acción del viento (islas orientales). Este proceso se ve dinamizado por las altas pendientes y la ausencia de cubierta vegetal en algunas zonas de las islas. Todas las islas Canarias están sometidas a procesos erosivos, si bien la menos afectada es la isla de La Palma y la más erosionada es Fuerteventura, que curiosamente según la definición de monte, es la que más superficie forestal tiene.

Otro aspecto a tener en cuenta en la gestión superficial de los recursos hídricos, es la enorme irregularidad climatológica de las propias islas (microclimas y pisos de vegetación o catenas), también entre archipiélagos de la Macaronesia en general. Por ejemplo entre las propias Islas Canarias o entre Cabo Verde y Azores etc. también la gran pendiente de sus cauces determina que los proyectos de aprovechamiento de escorrentía superficial, exijan el complemento de obras o elementos relacionados con las infraestructuras de almacenamiento, tales como balsas o embalses impermeabilizados artificialmente, desarenadores, canales de derivación etc.



Figura 6.1; Encauzamiento de barranco en la ciudad de La Laguna (Santamarta JC, 2012)

Por otro lado también es importante tener en cuenta, las fuertes precipitaciones que caracterizan un régimen torrencial característico de las islas. Por ello es necesario conocer las posibles avenidas y caudales punta en los barrancos, la frecuencia

de los mismos (cálculo para tiempos de retorno fiables) y volumen de aguas totales, también para su uso en la planificación territorial y la previsión de sus efectos en la población y en el territorio.

Las masas forestales regulan los recursos hídricos provenientes de la precipitación y de la lluvia horizontal (en las masas expuestas a barlovento de las islas preferentemente) y, por este motivo es importante que cuando ocurre un incendio forestal en la cuenca hidrográfica de estudio, se vuelven a recalcular los parámetros hidrológicos, debido a que estos se modifican al perder cubierta vegetal la superficie de estudio. En estos casos, los caudales punta se incrementan (entre un 25 y 30%) y el tiempo de retorno se reduce. Por ejemplo; un cálculo de recurrencia de 10 años se puede llegar a reducir a 5, aunque obviamente depende de la cuenca de estudio.

2. Importancia de la hidrología insular

El estudio y control de la erosión, en la hidrología superficial en los terrenos de las islas volcánicas es fundamental. Inicialmente por que la escorrentía genera graves problemas aguas abajo, como por ejemplo: afectación a carreteras, caminos, pistas forestales, poblaciones, cultivos. Por otro lado estas aguas son el vector que utiliza la erosión para dismantelar la isla. El proceso es el siguiente: precipitación en las partes superiores de la isla; el agua se evacúa por los barrancos llegando a la costa, estas lluvias pueden afectar a infraestructuras que se encuentren en el trazado de los barrancos aterrándolas con los materiales transportados; por último alcance de la costa y evacuación en el mar. También otra cuestión es, evidentemente, el posible aprovechamiento de estas aguas, el cual puede llegar a ser importante por la calidad (prácticamente sin sales) si bien no suponen unos porcentajes muy elevados en el cómputo global de los recursos hídricos de las islas (en Canarias no suponen más de 6-7 % del total de los recursos).

La cuenca hidrológica junto con los acuíferos, son las unidades fundamentales de la hidrología insular. Su correcto conocimiento puede aumentar en cantidad y calidad los recursos hídricos disponibles; en el caso de los recursos hídricos superficiales también hay controlar su exceso, por los problemas que puedan ocasionar, como se ha comentado.

Desde el punto de vista del profesional de la ingeniería hidrológica, es necesario manejar los siguientes problemas técnicos.

- Diseño de tomaderos de barranco u obras de toma.
- Diseño de presas, (vertederos, muro, aliviaderos, capacidad, etc.).
- Diseño de hidrotecnias, (pendientes de compensación, muros, diques, fajinas, diseño y materiales, resaltos hidráulicos, etc.).
- Estimación de la pérdida de suelo.
- Estimación de la tormenta de diseño y su conversión a una avenida generada en la cuenca volcánica.
- Estabilidad de encauzamientos (aguas abajo), terraplenes y laderas.
- Control de avenidas.
- Diseño de infraestructuras transversales al barranco, tales como puentes, pasos de caminos agroforestales, conducciones, obras de paso, etc.

3. Descripción de las cuencas y red hidrográfica

Todas las islas volcánicas se dividen en varias cuencas hidrográficas o sectores hidrológicos insulares (SHI), son microcuencas (de superficie mucho menor que en los terrenos continentales, como norma general) que funcionan como vías de drenaje prioritarias, cuya función es evacuar el agua de escorrentía formada por la lluvia, que proviene de las partes altas de las islas con dirección hacia la costa. También dentro de una propia cuenca hidrográfica se pueden establecer subcuencas. A modo de ejemplo, sólo en la isla de Tenerife existen 319 barrancos, 5.346 cauces que totalizan en su conjunto una longitud de 5.617 km (PHI Tenerife, 1990).

Las cuencas pueden ser endorreicas (cerradas) y en este caso desembocan en un lago, (Lagos de San Miguel en Azores) y exorreicas (abiertas), desembocan en un punto de salida que se localiza en los límites de la cuenca y, a su vez la descarga se vierte en una corriente o en el mar por la costa, siendo este el caso habitual de las Islas Canarias.

Las cuencas hidrográficas se pueden dividir en función de su tamaño e importancia en;

- Barrancos.
- Barranquillos.
- Barranqueras.



Figura 6.2; Barranco con aprovechamiento hidráulico mediante presa en la isla de Tenerife (Santamarta JC, 2012)

Como se comentó, los barrancos funcionan como vías de drenaje y conducción de las aguas de lluvia y también las procedentes de manantiales, sobre todo en la época de lluvias. Geológicamente están compuestos de varios manantiales. Los barrancos garantizan el flujo superficial del agua y el flujo subálveo en profundidad, de ahí que en algunos casos se haya aprovechado este recurso mediante pozos y sondeos o bien en Gran Canaria mediante minas de agua transversales al barranco (se hablarán de esta tipología de minas en capítulos posteriores).

Uno de los mayores problemas que hay en las islas volcánicas con excesiva presión urbanística es la invasión sistemática de los cauces por la actividad antrópica y agrícola, e incluso en algunas ocasiones se llegan a usarse como vertederos de escombros, residuos sólidos urbanos, etc., con lo que no sólo se produce un deterioro sistemático del medio ambiente, sino que se aumentan extraordinariamente los daños durante crecidas provocadas por lluvias.

Históricamente en Canarias, debido a que el agua subterránea es en su mayoría de dominio privado, hasta la legislación vigente de 1985, las aguas superficiales han atraído el mayor porcentaje de inversiones públicas. Éste aprovechamiento ha sido experimentado extensamente en las islas occidentales como Tenerife (con más fracaso que acierto), La Gomera (lugar con mayor densidad de presas del mundo) y en

las orientales como Gran Canaria. El Hierro y La Palma por la permeabilidad de sus materiales no han optado por esta técnica.

La escorrentía superficial en las islas occidentales, proporciona unos caudales muy inferiores a los captados por explotaciones subterráneas. De hecho suponiendo un aprovechamiento máximo de este agua no aportaría ni un 8% de recursos hídricos a los balances de las citadas islas, resultando mayor este porcentaje en La Palma.

Tabla 6.1; Datos hidrológicos de escorrentía del archipiélago Canario. PHI de los diferentes Cabildos. (Datos en hm³).

ISLA	ESCORRENTÍA (hm ³)
Lanzarote	1,30
Fuerteventura	4,90
G.Canaria	75,00
Tenerife	20,00
La Palma	15,00
La Gomera	8,00
El Hierro	0,30
Totales	124,50

4. Tipos de suelos volcánicos

Los suelos volcánicos son en general mi jóvenes comparados con los suelos de terrenos continentales. Son suelos muy productivos que han sido la base de la economía de muchas islas volcánicas, debido a su gran fertilidad. La tipología de suelos representada en los terrenos volcánicos son los *Andosoles* y los *Andisoles*. En los Andisoles el material original lo forman, fundamentalmente, cenizas volcánicas, pero también pueden aparecer sobre otros materiales volcánicos como son las tobas, pumitas, lapillis (picón) y otros productos de eyección volcánica (Guerra et al., 2003). Suelen aparecer en pendientes importantes lo que obliga a los agricultores a realizar abancalamientos para su uso. El perfil es de tipo AC o ABC.

Los Andisoles con carácter ándico, son la tipología de suelo que ocupan una mayor extensión en las áreas forestales de Canarias y, la erosión hídrica es el mayor factor que influye en el creciente proceso de desertificación que se observa en la mayoría de islas del archipiélago Canario (Rodríguez et al., 2002).

Otros suelos presentes en regiones volcánicas como Canarias son los Vertisoles, Aridisoles, Ultisoles, Alfisoles, Inceptisoles and Entisoles. Estos suelos se distribuyen en secuencias altitudinales climáticas y cronológicas atendiendo a factores ambientales como el clima, la topografía o la edad de los materiales parentales. Los Aridisoles se sitúan en las zonas costeras coincidiendo con condiciones climáticas áridas. Los Vertisoles suelen ubicarse en cotas superiores relacionados normalmente con depósitos coluviales. En un nivel más alto suelen encontrarse los Alfisoles y los Ultisoles, estos últimos en localidades con mayor humedad. Los Inceptisoles son suelos incipientes se localizan en todas las franjas altitudinales excepto en la costa. Los Entisoles están relacionados con la presencia de materiales geológicos recientes o topografías abruptas que dificultan el desarrollo edáfico.

Según un estudio de un estudio elaborado por la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación Territorial del Gobierno de Canarias unas 329.000 hectáreas del archipiélago, el 43% de su superficie, están sometidas a intensos procesos de erosión por la lluvia y el viento, siendo Fuerteventura y Gran Canaria las islas que sufren este problema de forma más acuciante. Estos procesos de erosión hídrica y eólica suponen grandes pérdidas de suelo y por lo tanto pérdidas económicas y ambientales.



Figura 6.3; Acumulación de acarreo en un barranco en Tenerife (Santamarta JC, 2012)

El suelo es un elemento del ecosistema difícilmente recuperable, la degradación de sus propiedades iniciales (físicas, químicas y biológicas), así como la pérdida de nutrientes y de sus partículas más finas, hacen que el proceso de regeneración sea muy lento.

Factores tales como; pendientes superiores al 30%, cobertura vegetal inferior al 60%, elevada erosividad de las lluvias fuertemente estacionales y otros factores antrópicos de uso del suelo, determinan en mayor medida que la erodibilidad en sí misma, el grado y la intensidad de la morfología erosiva (Ortega et al., 1992).

Hay que destacar también que existen estudios publicados, sobre la importancia y las singularidades que presentan los medios volcánicos para mitigar la erosión, principalmente los medios para optimizar los recursos hídricos para su aprovechamiento por la planta mediante piroclastos para la condensación de agua de rocío. Otro aspecto importante es la importancia de los sistemas radicales del *Pinus canariensis*, porque favorecen la sujeción de los suelos volcánicos y mejoran la infiltración y, por lo tanto, en cierta medida la recarga de los acuíferos insulares. Por último, las diversas tipologías de hidrotecnias u obras forestales de conservación de suelos para contener sedimentos y su relación con las infraestructuras hidráulicas.

5. Hidrometeorología , estudio de parámetros hidrológicos

Un aspecto básico para la toma de decisiones en el ámbito hidrológico -en una cuenca de un barranco volcánico, es conocer la disponibilidad de agua - caudales posibles y utilizables- en función de sus parámetros hidrológicos (escorrentía, infiltración...). No obstante en general se carece de mucha información y datos hidrológicos que permitan con garantías realizar un balance hidrológico en una isla (menos estudiada que los continentes). Aunque es posible realizar estimaciones con los datos disponibles de estaciones meteorológicas ubicadas en las proximidades de los barrancos, aunque esta información hay que trabajarla, con bastantes matices, recordando nuevamente las singularidades que tienen las islas y, en particular las islas Canarias con la existencia de microclimas en determinadas zonas debido a la altitud, vegetación y orientación (vientos alisios), por lo que se recomienda hacer transeptos entre las estaciones. Otro problema es la variedad de organismos -públicos o no- que disponen de sus propias estaciones haciendo complicada una gestión global. Por ejemplo sólo en la isla de Tenerife existen las siguientes fuentes de información de la meteorología de la isla:

- Agrocabildo.
- Aena.
- Teleférico de Tenerife.
- AEMET.
- Antiguo ICONA (muchas abandonadas o perdidas).
- Observatorio Izaña.
- Parques Nacionales.
- Consejo Insular de Aguas.
- Universidad de La Laguna.
- Usuarios privados.
- Otras.

Las estimaciones por lo tanto, son el resultado del tratamiento estadístico de los registros de precipitación recogidos en estaciones meteorológicas cercanas, o mejor, como se ha comentado, transeptos a diferentes cotas, así como la recolección de datos recopilados en campo, mediante mediciones por aparatos de los volúmenes de escorrentía cuando se producen precipitaciones suficientes. También se incorporan observaciones geológicas e hidrogeológicas, consultas bibliográficas y análisis de la información.

A la hora de estudiar las precipitaciones en las cuencas, es necesario recabar toda la información posible, inicialmente en bases de datos - en Canarias hay diversas instituciones que las manejan como se ha comentado -. Para la isla de Tenerife se recomienda la web www.agrocabildo.com, donde están los estudios agrometeorológicos del físico Luis Manuel Santana Pérez con una excelente calidad (se recomienda tomar mínimo, un periodo de 20 años). Una vez ordenados los datos recabados, se obtienen la cantidad de lluvia acumulada por estación y por año. Con estos datos se realiza un tratamiento estadístico con el fin de evaluar el mejor ajuste de una función de probabilidad y del periodo de retorno. Los valores de precipitación anual acumulada se analizan espacialmente mediante isovalores, delimitando las *subcuencas* y se ubican las estaciones pluviométricas. Finalmente se obtienen las isoyetas para la zona, (líneas de igual precipitación anual).

En las cuencas hidrográficas de las islas volcánicas -debido a su pequeña extensión- la información aportada por estas estaciones se considera suficiente para la realización de un análisis hidrológico, teniendo en cuenta que se tiene un área pequeña de captación, además, de su distribución en el entorno del área.



Ilustración 6.4; Estación meteorológica en el Parque Nacional de Taburiente, en La Palma (Santamarta J, 2008)

6. Barrancos y cuencas volcánicas

Al referirnos a los barrancos de las islas volcánicas, se debe comentar la implicación que tiene la existencia, o no, en la morfología insular, ya que su presencia, *a grosso modo*, implica que hay un porcentaje de la precipitación que transcurre libremente por ellos y que los modela con el paso del tiempo. Se puede asumir zonas impermeables en la isla de estudio.

Una isla volcánica, que no presente prácticamente barrancos podemos entenderla como permeable, es decir la mayoría de las precipitaciones, salvo la cantidad que se evapora y se intercepta por la planta, es infiltración. Un ejemplo lo tenemos con la isla de El Hierro, el caso contrario podría ser la Gomera con bastantes barrancos, zonas impermeables (aflora el complejo basal) y por ende elevado número de embalses (la mayor densidad del mundo de presas).

En otro sentido, al hablar de planificación hidrológica, el hecho de la existencia de barrancos puede implicar la aparición del aprovechamiento de estas aguas mediante presas, con unos condicionantes técnicos, económicos y geológicos importantes. La inversión es muy elevada y el rendimiento es extremadamente bajo.

Otro aspecto a tener en cuenta es la cantidad y periodicidad de las lluvias, es decir, su régimen pluviométrico; el régimen de lluvias de las islas es torrencial, esto implica, que cuando llueve, esta lluvia es importante en cantidad y cae en poco tiempo. Este factor comentado, unido al de la realidad de las grandes pendientes en las islas occidentales, hace que los barrancos transporten importantes cantidades de acarreo y materiales suspensión, incluyendo incluso rocas de grandes tamaños, a velocidades de caudal elevadas, del orden de 10 m/s, lo que perjudica a priori a los embalses con presas ya que estas se aterran con facilidad y su vida útil se reduce considerablemente.



Figura 6.5; Barranco de Las Angustias en La Palma. (Santamarta JC, 2007)

Los barrancos en general, son vías preferentes de drenaje del agua de lluvia, aunque prácticamente todo el año se encuentran secos, en ciertas épocas del año coincidiendo con las épocas de lluvia suelen llevar algo de caudal, que es aprovechado mediante *tomaderos u obras de toma*, dispuestos en zonas estratégicas de los barrancos. Estas infraestructuras se estudiarán brevemente en el capítulo dedicado a obras hidráulicas superficiales.

Otro aspecto fundamental en los barrancos en relación con los aprovechamientos subterráneos del agua, es el régimen subálveo, los caudales movilizados son importantes y de hecho existe una cultura de aprovechamiento de los mismos mediante pozos y más recientemente sondeos. Esta tipología de obras tiene su precedente en

las *rosas* o *rozas* de Fuerteventura donde se excavaba en el lecho del barranco hasta alcanzar el nivel freático, obviamente esta obra desaparecía al ocurrir una avenida importante.

Las potencias de acarreos que pueden tener los barrancos, principalmente en su desembocadura son muy elevadas, basta ver el ejemplo de los barrancos de la Gomera, donde se pueden alcanzan cotas de más de 100 m.



Figura 6.6; Acarreos de barranco en Tenerife. (Santamarta JC, 2012)

Los barrancos, más concretamente las medianías, han sido notablemente aprovechados por la agricultura, inicialmente de subsistencia y posteriormente para la exportación, en menor medida esta última.

Los barrancos los podemos clasificar en *CENTRALES, DE MEDIANÍAS Y COSTEROS*;

6.1. Barrancos centrales

Son aquellos que parten de las dorsales, en las zonas más elevadas de las islas, zona generalmente de mayor pluviometría, toman dirección hacia la costa. En las islas circulares parten radialmente desde el estratovolcán que funciona como un punto generador. Tienen una serie de características importantes que los definen como son;

- Alta vegetación arbórea, esto hace que se sujete el suelo y por tanto favorece que no haya tanto arrastre de materiales.
- Cotas elevadas de la 1.500 a la 400 m.



Figura 6.7; Barranco joven en “V”, en la zona de Güimar Tenerife (Santamarta J, 2009)

- Elevadas pendientes, lo que favorece la erosión de las zonas descubiertas de vegetación autóctona.
- En algunos casos llevan pequeños cursos de aguas (arroyos) con vegetación asociada, sobre todo después de los periodos de lluvia.
- Poco afectados por la acción antrópica, algunos cultivos no mecanizados.
- La morfología de estos barrancos es en “V”.
- La potencia de acarreos es inferior a las otras dos tipologías de barranco.
- El aprovechamiento del recurso hídrico se realiza además de mediante pozos y sondeos, por alguna galería orientada hacia las dorsales.
- Es la parte de la cuenca hidrográfica que más recursos hídricos aporta.

- Los recursos hídricos son de mayor calidad.
- Aprovechan el agua de *lluvia horizontal* y, por el encajonamiento que presentan, disponen de un aporte de agua por condensación o rocío.
- Se encuentran por norma general atravesados por bastantes *diques*, que pueden generar nacientes.

6.2. Barrancos de medianías

Es el curso de barranco que transcurre en la zona media de la isla, por lo general son los tramos con mayor longitud y extensión, así como mayor implicación en la economía agraria de las islas.



Figura 6.8; Barranco en zona media en la Gomera (Santamarta J, 2009)

Estos barrancos se asocian a las zonas de medianías de las islas, zonas con mayor fertilidad agrícola en las islas occidentales, otro factor son las poblaciones que atraviesa, en mayor cantidad cuanto mayor es la cercanía a la costa.

Las características principales de esta tipología de barrancos se pueden sintetizar como;

- Presión antrópica, (cultivos, núcleos poblacionales pequeños...)
- La cobertura vegetal es escasa, por lo tanto los procesos de erosión se comienzan a notar.
- Elevados aportes de acarreos y materiales sueltos desde las laderas hacia los barrancos.
- La cota a la que se sitúan es a partir de la 400 m hacia el mar.
- Las pendientes, son elevadas aunque se van suavizando.
- Se pasa de una cobertura arbórea a una arbustiva aunque realmente depende de otros factores como la ubicación del barranco -barlovento o sotavento-, tipo de suelo, pluviometría, en general las condiciones meteorológicas y ambientales de la isla.
- Aparecen las conducciones y los canales de distribución de los caudales alumbrados por las galerías.
- El aprovechamiento principal son los pozos, sondeos y en algunos casos los tomaderos y embalses, donde las características del suelo (permeabilidad) lo permitan.
- La forma morfológica de esta tipología de barrancos es en “U”, como norma general.

6.3. Barrancos costeros

Estos barrancos, son los tramos finales de las vías de drenaje estudiadas, en este caso el cauce llega hasta el mar, las pendientes son muy suaves y la presión antrópica es total.

En esta parte del barranco se suelen localizar los aprovechamientos de áridos de los cauces, regulados por los Consejos Insulares de Agua. En esta área se concentran las

explotaciones, debido a que por transporte de sedimentos en esta zona del barranco se encuentran las mayores potencias de acarreos.



Figura 6.9; Barranco en zona de costa en la isla de Lanzarote (Santamar-
ta J, 2009)

La morfología de estos barrancos es en general bastante llana, ya no se encuentran diques y relativamente pocos paleosuelos.

Otras características son;

- Afectados por la influencia de las mareas.
- Zona de descarga al mar del acuífero.
- Afectados por la urbanización masiva.
- Las aguas están muy cargadas de sólidos en suspensión
- Las aguas son de peor calidad en algunos casos afectados por vertidos
- Algunos suelen acabar en playas, generalmente de callados.
- Nivel freático relativamente cerca de la superficie, ciclo subálveo.
- En muchas ocasiones rellenos de escombros y basuras.
- Edificaciones ilegales.
- Taponamientos en obras de paso y puentes.

El aprovechamiento en esta parte del curso del barranco, suele ser mediante pozos y sondeos, el problema fundamental que presentan estas captaciones es la *intrusión marina*. Esta, generalmente es provocada por sobreexplotación de la captación, que hace que se degrade el agua por la incorporación de sales procedentes de la interface agua dulce-agua de mar.

Hablando de las islas orientales, en el caso de los barrancos, es interesante comentar que en Fuerteventura, aquéllos tienen implicación con la calidad de agua superficial, en el sentido de;

- Los aportes de los nacientes, son salinos y se produce el lavado de las sales depositadas en el suelo.
- En los aprovechamientos superficiales de la escorrentía se puede afirmar, que los nacientes incorporan más salinidad a medida que se acercan a la costa.
- Los aprovechamientos mediante *gavias* se realizan en las zonas de costa, aprovechando también los nutrientes que transportan las aguas desde las zonas altas de la isla que incluso mejoran la fertilidad y producción de los suelos en esas zonas.



Figura 6.10; Barranco antiguo en la isla de Fuerteventura (Santamarta J, 2008)

Para concluir esta sección conviene hablar nuevamente de los problemas actuales que presentan estos barrancos o vías preferentes de evacuación, como se comentó al hablar de las cuencas hidrográficas. Los problemas fundamentales, son la invasión de los cauces por la actividad humana y la consiguiente alteración de la red hidrográfica y el medio ambiente natural. También se detectan los siguientes problemas específicos, aunque año tras año la Administración está trabajando en la mejora continua y mantenimiento de los cauces:

- Ocupación.
- Peligro de inundaciones.
- Escombros y vertidos de todo tipo.
- Falta de delimitación de zonas inundables
- Falta de delimitación de cauces.

7. Arrastre de materiales, procesos de erosión hídrica

La erosión es un proceso natural de naturaleza física y química que desgasta y destruye y transporta continuamente los suelos y rocas de la corteza terrestre. Este proceso se puede ver acentuado, modificado o corregido, por la acción antrópica.

La mayoría de los procesos erosivos son resultado de la acción combinada de varios factores, como el calor, el frío, los gases, el agua, el viento, la gravedad y la vida vegetal y animal. En algunas regiones predomina uno u otro factor, como el agua y el viento en las islas volcánicas.

La erosión depende de los siguientes factores;

- Cantidad e intensidad de la lluvia.
- Características de la cobertura vegetal.
- Pendiente y topografía del terreno.
- Propiedades físicas y químicas del suelo.

El proceso de erosión hídrica comienza con la lluvia, que cae en el suelo disgregándolo debido a la energía cinética de las gotas de agua, posteriormente se forma la escorrentía, se crea entonces un flujo laminar en los terrenos más elevados de las laderas. Entonces es conducido hacia las zonas más bajas en pequeños regueros

que se transforman rápidamente en grandes cárcavas de difícil corrección y tratamiento. El agua de la lluvia también se infiltra en el terreno y puede lubricar los procesos de movimientos de laderas en aquellas que no sean estables.

La aparición de la erosión en cárcavas, guarda en gran medida relación con prácticas inadecuadas de utilización de la tierra, por ejemplo las cortas abusivas de masas forestales, ejecución de desmontes sin postratamientos o los incendios forestales. La erosión en cárcavas es una de las expresiones finales de la erosión superficial y, ocupa dentro de ésta, el nivel máximo de erosión. Este tipo de manifestación es precedida por los procesos anteriores, -laminar, surcos-, al aumentar el volumen de escorrentía o incluso su velocidad.

Al proceso de la erosión se le considera uno de los principales problemas ambientales a nivel global en las islas volcánicas, asociado en gran medida a la pérdida de cubierta forestal. El esquema de funcionamiento de la erosión es por una parte el desprendimiento del material, transporte (mediante agua, viento...) y finalmente, el depósito; en el caso de una isla volcánica este depósito en general, se lleva a cabo en las zonas cerca de costa de los barrancos, de hecho hay zonas en Canarias concretamente en barrancos de La Gomera, donde se han llegado a estimar potencias de acarreo importantes; incluso algunos autores hablan de creación de deltas en los desagües de los barrancos.

El proceso de producción y transporte de sedimentos es como sigue; en las laderas donde se encajan los barrancos toneladas de suelo cada año son disgregadas por el efecto de las lluvias sobre el propio terreno; esto es lo que se denomina producción de sedimentos. Estos sedimentos por acción de la lluvia y mediante la escorrentía son conducidos pendiente abajo hasta llegar al barranco, donde, con las aguas de avenida más otros sedimentos hacen un efecto acumulativo importante, llegando incluso a llevarse por delante infraestructuras y transportando bolos o piedras de gran tamaño.

Si no tienen salida natural al mar, estos sedimentos se almacenan en los embalses cuya obra de cierre intercepte el curso de los barrancos, haciendo que estos pierdan su capacidad de almacenaje, eficiencia hídrica y rentabilidad. También disminuyen la calidad de las aguas embalsadas aumentando su turbidez. En las islas Canarias hay un caso llamativo en Fuerteventura donde la Presa de las Peñitas está completamente colmatada de sedimentos hasta la coronación del muro.

La tensión de arrastre (T), ejercida por una corriente de agua viene definida mediante la siguiente expresión;

$$T = Pe * h * J$$

Donde;

Pe = Es el peso específico del agua con materiales en suspensión.

h = Altura de la lámina de agua.

J = Pendiente del terreno.

La erosión hídrica puede darse en profundidad; este efecto corresponde a los desplazamientos en masa que realiza una parte del terreno por la acción oculta de las aguas infiltradas. El agua lubrica el terreno y crea unas condiciones propicias para que se desplace por efecto de la gravedad. Los materiales deslizan, por acción del esfuerzo cortante, a partir de cierta magnitud de pendiente, la cual se da con cierta frecuencia en las cuencas volcánicas.



Figura 6.11; Actuaciones en la traza del barranco con hidrotecnias transversales para reducción de caudales sólidos y velocidad en la corriente del agua (Santamarta JC, 2012)

Otro efecto generado por las lluvias torrenciales ocurre cuando el suelo está saturado de agua, tras muchos días con continuas lluvias, esto, acaba por provocar deslizamientos en la laderas cuyas secuelas y proporciones se agravan por las fuertes pendientes que presentan, como ya se ha comentado. En este sentido el agua actúa como lubricante de los materiales volcánicos.

8. Análisis de avenidas. Recomendaciones para un terreno volcánico

Los cálculos y análisis de avenidas para un terreno volcánico, en base a los regímenes torrenciales de las islas del presente estudio, resultan fundamentales. Para conocer la magnitud real de las lluvias en esta tipología de terreno se recuerda la histórica lluvia acaecida en Santa Cruz de Tenerife. En base a los datos registrados por el pluviógrafo de la estación principal de Santa Cruz de Tenerife, a raíz de la tormenta del 31 de marzo de 2002, se tiene conocimiento que ese día en dicha estación se recogieron 232 mm de lluvia en 24 horas; pero sólo en 5 minutos (de 17:00 a 17:05) cayeron más de 14 mm, equivalente a unos 168 mm/h de intensidad de lluvia (ATAN, 2002).

Por ello es de sobra recomendable tener en cuenta para los cálculos de las infraestructuras periodos de recurrencia fiables, dada la variabilidad de las lluvias en las islas volcánicas.

Como se ha comentado en las islas oceánicas, en este caso particular las lluvias no son nada previsibles y se puede dar el caso de una gran lluvia excepcional de características catastróficas por lo que se complican los proyectos en los que haya que calcular los caudales máximos de avenida así como las grandes infraestructuras como los tomaderos o embalses.

Bibliografía consultada y referencias

- CABILDO DE TENERIFE (1990); Plan Hidrológico Insular de Tenerife. <http://www.aguastenerife.org>
- BEN HUR, M. FERNANDEZ, C. SANTAMARTA CEREZAL, J.C. (2009); Ecological Studies. Chapter; Overland flow, soil erosion and stream water quality in forest under different perturbations and climate conditions. Ed. Springer. Germany.
- GUERRA, JA., ARBELO, CM. ET AL. (2003). Erosión diferencial de andosoles y aridisoles en dos zonas climáticas de Tenerife. Edafología Vol. 10. pp 229-237.
- ORTEGA, M.J., GONZÁLEZ, M.C., PADRÓN, P.A. Y RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ, A. (1992); Estudio de las propiedades físicas de los horizontes superficiales de los suelos volcánicos de Canarias. Su influencia en la erodibilidad. Comunicaciones. III Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Universidad de Navarra. Pamplona: 564-567

- RODRIGUEZ A, ARBELO C.D., GUERRA, J.A., MORA J.L. (2002); Erosión hídrica en andosoles de las islas Canarias. Edafología, Vol. 9 (1), pp. 23-30.
- SANTAMARTA CEREZAL, J.C. (2008); *Estudio y evaluación de las hidrotecnias e infraestructuras hidráulicas para la prevención de la desertificación en el archipiélago Canario*. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales. Grupo de trabajo; Hidrología Forestal.
- SANTAMARTA CEREZAL, J.C. NARANJO BORGES, J. et al. (2012); *Ingeniería forestal y ambiental en medios insulares. Métodos y Experiencias en las Islas Canarias*. Ed. Colegio de Ingenieros de Montes en Canarias.Tenerife.670 pág.
- SANTAMARTA CEREZAL, J.C. (2008); *Una visión histórica de algunas de las más importantes obras y restauraciones hidrológico forestales en el archipiélago Canario en el periodo 1.905 - 1.986*. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales. Grupo de trabajo; Historia forestal.
- SANTAMARTA CEREZAL, J.C. (2007); *Medidas destinadas a la prevención de la salinización de las aguas por intrusión marina*. Libro Jornadas contra la desertificación ISBN9788491193905
- SANTAMARTA CEREZAL, J.C. (2009); *Singularidades sobre la construcción, planificación y gestión de las obras y recursos hídricos subterráneos en medios volcánicos. Estudio del caso en las Islas Canarias occidentales*. Tesis (Doctoral), E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos (UPM) .Universidad Politécnica de Madrid.



Aprovechamientos de los recursos hídricos superficiales en un medio insular y volcánico

Juan Carlos Santamarta Cerezal
Jésica Rodríguez Martín

1. Introducción

Una de las características de los parámetros hidrológicos del terreno volcánico es la gran permeabilidad en origen de los materiales que conforman las islas, este hecho condiciona notablemente la selección técnica y óptima del aprovechamiento hidráulico en una isla volcánica. En el caso de las Islas Canarias, como norma general se ha recurrido para satisfacer las demandas hídricas al agua subterránea (en las islas occidentales principalmente), destaca la isla de Tenerife con un 80% de recurso subterráneo. Pero existen dos casos notables donde la apuesta para ese abastecimiento, principalmente para la agricultura, fueron los embalses y balsas para la regulación y almacenamiento de agua, es decir, el aprovechamiento de los recursos superficiales; son los casos de Gran Canaria y La Gomera mediante la construcción de presas. Tenerife por otro lado ha potenciado la construcción de balsas las balsas y por último Fuerteventura con la construcción de presas de materiales sueltos o charcas.

Algunas islas, como las comentadas, disponían de terrenos con cierta impermeabilidad, para poder hacer viable la construcción de presas y embalses, en el caso de las balsas se ha tenido que recurrir a la impermeabilización artificial-algo muy costoso y complejo de construir- mediante el movimiento de tierras y la colocación de láminas plásticas o geomembranas, con el fin de poder ejecutar la obra de almacena-

miento; esta infraestructura es complementada, en algunos casos, por el tomadero de aguas que conduce esta desde los barrancos hacia las balsas o bien puede ser alimentada por conducciones desde las galerías, plantas desaladoras o de terciarios de depuradoras (de uso en agricultura).

Aunque el aprovechamiento de las aguas superficiales no supone un alto porcentaje de recursos útiles en las islas, sí tienen mucha importancia a nivel de calidad de las aguas porque son recursos hídricos muy poco cargados de sales, lo que supone que se pueden combinar con otras aguas de menor calidad. También hay una cuestión de tipo racional, que en un medio insular, con recursos hídricos limitados como el Canario, no es eficiente dejar pasar caudales de agua por los barrancos directamente al mar sin aprovecharlos, o por lo menos poner todos los medios disponibles para intentarlo.

2. Descripción de las cuencas y la red hidrográfica

Las precipitaciones en las islas Canarias, se producen de forma irregular y son de tipo torrencial, se puede tomar un valor medio de precipitación en Canarias de 400 mm al año con grandes diferencias entre las islas (más precipitación en la isla de La Palma), incluso con grandes diferencias en zonas de las propias islas, por ejemplo entre el Norte y el Sur de las islas (sotavento o barlovento). También en la propia Macaronesia hay unas diferencias más importantes si cabe, por ejemplo, entre Azores y Fuerteventura puede haber cerca de 2000 mm de precipitación de diferencia. Las lluvias presentan un patrón muy claro en el que la altitud sobre el nivel del mar y la orientación de la isla es decisiva, de hecho estas precipitaciones se concentran en las dorsales de las islas, principalmente en las zonas de vegetación importante, como la *laurisilva* o el *pinar canario*. Esta lluvia se ve complementada por la precipitación de niebla u horizontal en cotas de la 600 a la 1.300 metros sobre el nivel del mar, que puede llegar a multiplicar por 1,5 veces la convencional (depende del autor que se considere). Los diques se concentran en las dorsales lo que hace que el acuífero esté sobreelevado, por lo tanto, los aprovechamientos subterráneos mediante galerías de agua se orientan en general hacia esta dorsal, como es el caso de Tenerife y Hawái, entre otros sistemas insulares.

Como ya se ha comentado anteriormente, las cuencas hidrográficas en las islas volcánicas son de tamaño muy pequeño en comparación con las cuencas continentales. En el caso volcánico podríamos estar hablando de barrancos de unos 6-10 kilómetros, no obstante eso no quita de que cuando exista una precipitación impor-

tante transporten agua y sedimentos. En ocasiones, es posible que varios barrancos desagüen en uno por lo que hay un efecto acumulativo que puede llegar a ser catastrófico aguas abajo.



Figura 7.1; Puente de los Tilos cruzando un barranco en la isla de La Palma. (Santamarta JC, 2009)

Con ocasión de grandes lluvias torrenciales, los cauces de los barrancos suelen transportar las escorrentías hacia las desembocaduras en el mar. El resto del tiempo, salvo en algunos casos como el barranco de Las Angustias en la isla de La Palma, están prácticamente secos o con caudales exigüos en las cabeceras de barranco, generalmente tras lluvias importantes.

Por otra parte, hay una invasión sistemática de los cauces por la actividad urbanística, antrópica y agrícola, e incluso llegan a usarse como vertederos de escombros, residuos sólidos urbanos, etc., con lo que no sólo se produce un deterioro sistemático del medio ambiente, sino que se aumentan extraordinariamente los daños durante crecidas la formarse tapones en las vías de drenaje, formando inundaciones en las zonas de menor altitud de la isla.

3. Obras hidráulicas superficiales en medios volcánicos

Si bien, la obra magna del ingeniero hidráulico canario son las galerías o minas de agua, no hay que infravalorar las otras tipologías de obras hidráulicas como las superficiales, que se han ejecutado en Canarias ya que son de muy compleja concepción; de hecho los primeros abastecimientos a la población y a la agricultura del archipiélago procedían de esta tipología de obras, como los *nacientes*, *maretas*, *gavias* etc.

Las obras hidráulicas superficiales en Canarias han sido muy complejas de ejecutar, son muy costosas y en ellas se han realizado grandes esfuerzos técnicos y económicos. Como se comprobará más adelante salvo en el caso de las balsas, no es posible asemejar las infraestructuras del terreno volcánico e insular con el continental, hecho palpable en las presas con dimensiones y diseños similares a los continentales y rendimientos muchos menores. Evidentemente también existen singularidades en la calidad del agua almacenada y en el sistema de captación al no existir ríos ni flujos continuos de agua. Otro aspecto importante a tener en cuenta es el tiempo de residencia del agua en el embalse, esto provoca que se produzcan procesos de eutrofización y que la calidad del agua descienda notablemente.

Se puede hablar también de una ingeniería de balsas en Canarias ya que ha sido una región pionera en este sentido junto con otras regiones como Valencia y Murcia; actualmente se aplican notables mejoras en la ejecución, diseño y selección de materiales (sobre todo de impermeabilización), llegando a extremos de utilización del entorno físico y morfología de las islas. Un ejemplo es el uso de cráter de un cono volcánico como lugar de ubicación del embalse, caso ocurrido en la balsa de Taco en la isla de Tenerife, la cual requirió un mínimo de movimiento de tierras con una premisa de respeto medioambiental importante; la balsa se construyó con materiales sueltos, la impermeabilización fue llevada a cabo con una arcilla compactada y una geomembrana en las paredes laterales. Estas obras salvo algún caso aislado, están apartadas de la influencia de los barrancos, captando el agua de estos mediante tomaderos y conducciones de transporte. El agua también puede proceder de desaladoras, de agua drenada de galerías o minas de agua (excedentes o no) e incluso de EDARS aprovechándose como aguas de reutilización para determinados usos (agricultura, campos de golf, jardines), como se comentó anteriormente.

Se puede resumir el presente apartado en que la obtención de los recursos hídricos mediante infraestructuras superficiales, se hace especialmente difícil, salvo en casos

puntuales como en la isla de Gran Canaria y en La Gomera, en el caso de la isla de Tenerife, existe un plan de balsas que potenció el uso de esta infraestructura.

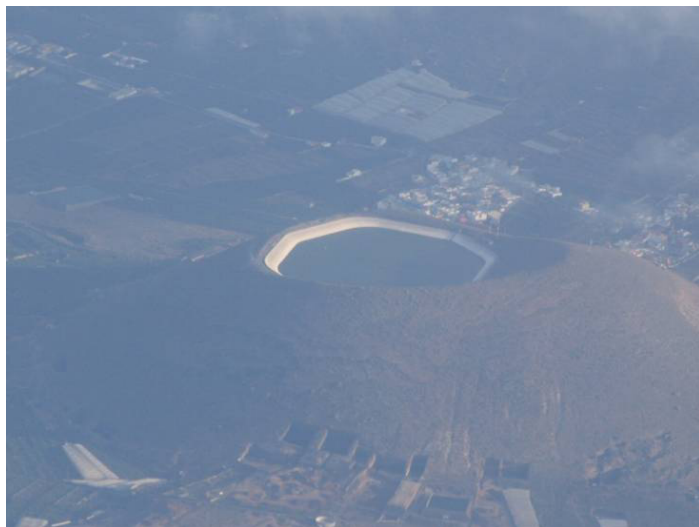


Figura 7.2; Balsa de Taco en Tenerife encajada en un cráter volcánico.
(Santamarta JC, 2012)

En la Isla de El Hierro prácticamente la escorrentía es muy escasa, por lo que su aprovechamiento de aguas superficiales, es nulo, existen 4 balsas dos para almacenamiento de recursos y otras dos para la regulación de una central de hidroeléctrica. En el caso de la Isla de La Palma existen los aprovechamientos de los manantiales, como el del Barranco de Las Angustias que se explota mediante un tomadero con su correspondiente desarenador. En el caso de Fuerteventura el aprovechamiento de estos recursos se efectúa mediante presas de embalse, *presas secas* o *charcas*, *gavias*, *nateros* y *aljibes*.

3.1. Los tomaderos de barranco

Para el aprovechamiento de las aguas que corren por los barrancos se puede optar por dos estrategias. Una es la construcción de una presa, lo cual supone un esfuerzo económico, ambiental y técnico importante, también requiere de unos estudios previos de permeabilidad, fundamentales y costosos de realizar para el éxito de la infraestructura, además evidentemente es necesario un terreno impermeable. Por último los embalses se aterran con suma facilidad en un terreno volcánico, debido

a lo explicado con el transporte de sedimentos por los barrancos producidos por las lluvias. También hay que tener en cuenta en el diseño que una gran avenida con arrastre de materiales podría dejar fuera de servicio al dique.

El otro sistema es la construcción de una derivación en el propio barranco, la derivación se puede realizar mediante un azud o pequeña presa, o bien un sistema de acumulación de aguas por rejillas. En definitiva, un tomadero es un aprovechamiento de aguas superficiales que se realiza a partir de toma directa de los barrancos, estos sólo están operativos cuando hay lluvias por lo que funcionan temporalmente y el agua recolectada se almacena en depósitos, balsas, incluso embalses cercanos.



Figura 9.3; Vista general del tomadero a dos aguas del barranco de las angustias en La Palma (Santamarta JC, 2007)

Los tomaderos, también llamados obras de toma en Canarias, además de la función de aprovechar aguas de lluvia que fluyen por los barrancos, cumplen la función de suministrar agua a las balsas. Por la irregularidad de las lluvias no se puede confiar en ellas, para el abastecimiento completo de aguas, son un complemento y una herramienta de regulación de recursos hídricos, incluso un almacén estratégico de agua. En Gran Canaria la mayoría de los tomaderos están vinculados a grandes presas.



Figura 9.4; Tomadero en la isla de Terceira en Azores. (Santamarta JC, 2011)

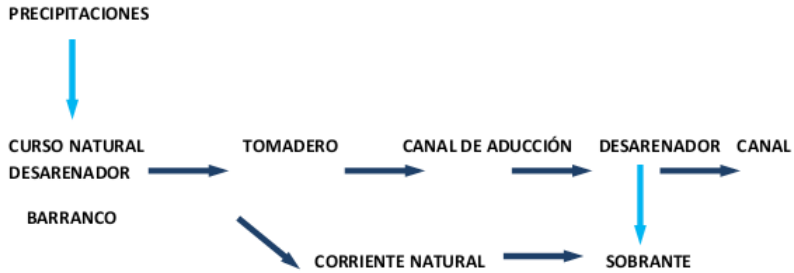
Este tipo de captación de una corriente natural, son típicas de regiones con gran orografía, constan de una estructura de toma del agua o “tomadero”, un canal desarenador y un canal de abastecimiento a una balsa, o a uno o a varios depósitos de regulación ubicados aguas abajo.

Las obras de toma en presas y balsas, por otra parte, constan, en general, de un canal de aproximación, compuertas de control y una canalización de salida del agua.

Un ejemplo muy ilustrativo en Canarias es el tomadero de “Dos Aguas” en el barranco de Las Angustias (Isla de La Palma), obra emblemática y singular de la ingeniería hidráulica de las islas, donde el agua es captada en la cota 400 y conducida a través de un canal con pendiente del 2 por mil hasta el Valle de Aridane, principal centro de producción de plátano en Canarias.

3.1.1. Componentes del tomadero

En relación al diseño de la infraestructura hay que tener en cuenta que el tamaño total de una obra de toma queda determinado por su carga hidráulica y por la capacidad de aducción requerida. La determinación de la combinación más rentable de cara al proyecto puede requerir la realización de estudios en los que se efectúen pruebas con elementos componentes de la obra.



Los elementos componentes de las obras de toma son:

- 1) Azud transversal al cauce.
- 2) Disipador de energía aguas abajo del azud.
- 3) Toma de rejillas; puede estar acompañado con compuertas.
- 4) Obra de recepción del agua que pasa las rejillas (canal lateral bajo las rejillas o cámara).
- 5) Vertedero de rebose (envía a la corriente el agua excedente).
- 6) Canal desarenador.
- 7) Obra de conducción.



Figura 7.5; Aspecto de la boca de entrada en el tomadero.(Santamarta JC, 2006)

El desarenador; es un tanque sedimentador cuyas dimensiones dependen del caudal de diseño del tomadero, de la distribución granulométrica de los sedimentos en suspensión que transporta la corriente natural y de la eficiencia de remoción, la cual oscila entre el 60 y el 80% del sedimento que entra al sedimentador. Los sedimentos son removidos periódicamente mediante lavado hidráulico o procedimientos manuales.

3.2. Las presas y embalses

Atendiendo a la definición de grandes presas La Instrucción para el Proyecto, Construcción y Explotación de Grandes Presas (Orden Ministerial de 31 de marzo de 1967) se definen, en su artículo 1.1, de la forma siguiente:

Son todas las presas de más de 15 m de altura, según la definición de altura que sigue en 1.5 [diferencia de cota entre la coronación y el punto más bajo de la superficie general de cimientos], o las presas entre 10 y 15 m de altura que respondan a una, al menos, de las condiciones siguientes:

- *Capacidad de embalse superior a 100.000 m³.*
- *Características excepcionales de cimientos o cualquier otra circunstancia que permita calificar la obra como importante para la seguridad o economía pública.*

Según esta definición en las islas Canarias existen casi más de 100 “Grandes Presas” por este motivo en el archipiélago Canario también destacan las grandes presas, denominación que se destina sólo a aquellas obras hidráulicas de retención de aguas de barrancos con más de 15 metros de altura o más de 100.000 m³ sólo en la isla de Gran Canaria existen 69.

Las presas se introdujeron en Canarias debido a la fiebre constructora de las mismas en la península Ibérica, donde solucionaban principalmente los problemas de abastecimiento urbano y riego agrícola, además de proporcionar energía, cuestión que no podría llevarse a cabo con los embalses canarios al no tener estos un flujo de agua continuo.

Las primeras presas construidas eran como pequeños muros o azudes de derivación para las *gavias* o *maretas*. Los materiales utilizados eran mampostería, construidas

con materiales locales y morteros de cemento-arena. Las presas más modernas son realizadas mediante hormigón.

En general los terrenos volcánicos jóvenes son permeables, salvo cuando aparece en superficie el complejo basal (impermeable) esto en Canarias ocurre en Gran Canaria, La Gomera, La Palma y Fuerteventura; aunque también hay un estudio que indica también la aparición del complejo basal en Tenerife en la zona de Anaga. Para poder construir los embalses era necesario disponer de terrenos impermeables, existía una necesidad de embalsar el agua que corría por los barrancos con motivo de las lluvias, en algunas ocasiones se recurrió a impermeabilizar los vasos del embalse, en terrenos con baja permeabilidad, mediante morteros de cal y cemento, el coste de esta actuación muchas veces no era justificable para el rendimiento obtenido, no obstante en aquella época no existía la posibilidad de la desalación, opción que existe actualmente, por lo que en muchas ocasiones no quedaba más remedio, que recurrir a estas actuaciones tan antieconómicas y con tan bajo rendimiento.

Siguiendo con las características del terreno donde se va a construir el embalse, obviamente, interesa que sea impermeable, Las formaciones antiguas generalmente suelen ser impermeables -complejos traquíticos-fonolíticos, basaltos antiguos-, más aún si se integran por rocas ácidas. Conviene iniciar el estudio del terreno con un reconocimiento ocular; este hay que complementarlo con la observación e identificación del aspecto de las rocas en las laderas. Buenos materiales impermeables son en general las traquitas, las ignimbritas y las tobas soldadas, el estudio del terreno debe estar avalado por ensayos completos de permeabilidad y geológicos.

Tabla 7.1 material volcánico y permeabilidad.(Proyecto SPA15)

Unidad	Coefficiente de almacenamiento %	Permeabilidad m/d	Transmisividad m ² /d
Basaltos alcalinos o antiguos	0,5 a 1	0,05 a 0,5	5-20
Traquitas	0,01-0,5	0,1 a 0,5	5-10
Traquitas-fonolitas	0,01-0,5	0,1 a 0,5	5-10
Materiales sedimentarios (formación detrítica)	3-5	1,5 a 8	50-200
Piroclastos basálticos	1-2	0,2-1	10-200

En relación a los recursos hídricos superficiales, el problema fundamental detectado; es la falta de datos y series pluviométricas; tampoco hay una cantidad importante de parámetros hidrológicos que pudieran haber dado más consistencia a las planificaciones hidrológicas de las islas, con el fin de evitar errores como la sobreesitimación de la escorrentía, como fue el caso de Tenerife.



Figura 7.6; Embalse de Soria en Gran Canaria, la presa de mayor altura del archipiélago. (Santamarta JC, 2010)

Otra cuestión importante es la calidad del agua embalsada, el material geológico del que están compuestos los barrancos, así como el de las cuencas aportadoras y la evaporación condiciona la calidad de las aguas que transportan, así serán más salinas cuanto más nos acerquemos a las islas orientales como es el caso de la isla de Fuerteventura. Esto habrá que tenerlo en cuenta a la hora de planificar un embalse, por el uso final que se vaya a dar al agua embalsada. Este uso nunca va a ser abastecimiento urbano quedando limitado en las islas Canarias a uso agrícola principalmente. Otro aspecto es la eutrofización del agua almacenada, este hecho se evidencia por el extenso tiempo de residencia del agua en el embalse y el poco movimiento de la corriente de agua.



Figura 7.7; Embalse de Las Peñitas en Fuerteventura, completamente colmatado. (Santamarta JC, 2008)

En general los grandes embalses de cientos de hectómetros cúbicos que se desarrollan en un terreno continental, como en la península Ibérica, no tienen cabida en los terrenos insulares volcánicos. Actualmente, en Canarias, para la construcción de embalses, ya no hay localizaciones viables económicamente ni competentes geológicamente hablando, para ejecutar este tipo de infraestructuras. Incluso varios autores apuntan que, en este tipo de terrenos volcánicos, la viabilidad y funcionalidad de las mismas está muy discutida, básicamente por la falta de terrenos 100% adecuados y el poco rendimiento de las mismas, ya que; a igualdad de material constructivo (hormigón), con una presa en terreno continental se obtiene mayores volúmenes de agua, cuando en el territorio volcánico se habla de casi uno o dos hectómetros como mucho. Además las presas en terrenos volcánicos no tienen un río o un flujo continuo de agua que vaya regenerando los caudales.

La mayor capacidad de almacenaje de recursos hídricos superficiales la tiene la isla de Gran Canaria con casi 43 hm³, donde el mayor embalse lo constituye la presa de Soria con casi 32 hm³ de capacidad de embalsamiento. Es curioso comentar que esta presa está en el ranking de las 15 presas más altas de España, la presa de tipo arco-bóveda se construyó en un periodo de 10 años, entre 1962 y 1972.



Figura 7.8; Tomadero en Gran Canaria para abastecimiento de presa. (González J, 2009)

Conviene decir que existe una compatibilidad importante entre la ejecución de las hidrotecnias superficiales de retención de sedimentos, con las grandes obras hidráulicas, debido a la capacidad de aquellas de disminuir el efecto de la erosión y el transporte de materiales; esto incrementa la vida útil de las presas. Esta técnica ha sido profusamente utilizada en la isla de Gran Canaria.

En general, a modo de resumen, las presas Canarias presentan las siguientes tipologías y características técnicas;

- La mayoría son clasificadas como grandes presas.
- En general son de gravedad.
- Fábricas de mampostería.
- Plantas curvas en su mayoría, existiendo de planta recta.
- Volumen embalsado medio 0,150 a 0,5 hm³, aunque pueden, en algunos casos, embalsar 32 hm³ (embalse de Soria en Gran Canaria).

- Alturas de presa de 15 a 40 m excepto de la presa de Soria en Gran Canaria con una altura de 135 m.
- No suelen tener aliviadero o bien este es un pequeño túnel a lo largo de la formación geológica o un pequeño orificio en el cuerpo de la presa, en caso de tener aliviadero este es lateral de labio fijo y con canal de descarga.
- Ancho de coronación de 3 a 5 m.
- Longitud de coronación de unos 100 m de media.
- En general las presas son de propiedad privada.

Las presas que se han ejecutado mediante mampostería han presentado una ventaja a nivel constructivo con respecto a las construidas mediante hormigón, el hecho de no presentar juntas de dilatación ha hecho que las presas de mampostería hayan sido de ejecutadas de manera más lenta, pero con la ventaja de no producirse grietas y aprovechar la bonanza del clima canario para poder trabajar con constancia en invierno y verano.

Las presas en Canarias tienen una relativa vida útil reducida, debido a un régimen torrencial de lluvias que transportan un caudal de sólidos importante, sobre todo cuando esos caudales que proceden de barrancos que no están recubiertos de una masa forestal. En las presas Canarias los aspectos ambientales como; fauna o los caudales ecológicos no tienen tanta importancia como el caso continental, lo mismo para escalas salmoneras etc., no existe prácticamente especies piscícolas a no ser que sean introducidas artificialmente.

Un aspecto positivo y una gran apuesta de futuro son la obtención de energía mediante centrales hidráulicas reversibles utilizando dos embalses a diferente cota, como es; el caso de la futura central reversible entre los embalses de Chira y Soria con una diferencia de cota de unos 400 m en la isla de Gran Canaria; se espera produzca el 25% del consumo energético de la isla. Este proyecto sigue la tendencia general del archipiélago de apostar por la energía hidráulica mediante otros proyectos realizados como el de la isla de El Hierro y futuras actuaciones en la isla de Tenerife y la Palma, si bien en estos casos los embalses son de balsas impermeabilizadas artificialmente.



Figura 7.9; Presa de mampostería en la isla de La Gomera. (Santamarta JC, 2008)

3.3. Las presas de materiales sueltos y charcas

Las presas de materiales sueltos son estructuras que están construidas por rocas o áridos sin cementar. Para conseguir la impermeabilidad de la presa se construyen pantallas impermeables de arcilla, asfalto o algún material sintético. Suelen ser económicas por que aprovechan materiales locales.

Las charcas también son construidas como presas de materiales sueltos, son usadas profusamente en la isla de Fuerteventura, construidas por los propios agricultores con alturas comprendidas entre 3 y 7 metros de muro; son presas que embalsan una cantidad pequeña de agua pero son vitales para la supervivencia de la agricultura de ese lugar.

No se puede hablar de “grandes presas” pero las infraestructuras utilizadas, como las pequeñas presas de materiales sueltos han tenido un papel muy importante en la dinamización de la economía insular, utilizadas principalmente para aprovechar el poco caudal que recorren los barrancos en la isla, llegándose a denominar charcas de tierra con tomadero de barranco.



Figura 7.10; Presa de materiales sueltos de El Siberio en Gran Canaria. (González J, 2010)

Existen presas de materiales sueltos convencionales, de grandes dimensiones, como la de El Siberio en Gran Canaria, aunque no es lo usual en el archipiélago. La presa en cuestión es un muro de 82 m, dique de escollera impermeabilizada con una pantalla de hormigón con tela asfáltica en el paramento de aguas arriba, el embalse tiene una capacidad de 4,5 hm³, las aguas están destinadas a regadío agrícola. La impermeabilidad del embalse se asegura al estar en un complejo traquítico-sienítico, con innumerables diques traquíticos.

Las presas secas las podemos considerar como otra tipología de aprovechamiento en el archipiélago. Son aquellas que utilizan para su construcción materiales sueltos, se impermeabilizan por arcillas y compactación de su base, que incluso puede cubrirse mediante finos o materiales en suspensión que transportan las corrientes de agua en su recorrido por los barrancos. Estas presas se pueden localizar en barrancos, donde retienen agua y limo de zonas altas de la isla, o bien pueden localizarse fuera de la zona de influencia del barranco, pero conectadas a este mediante un canal o acequia, donde incluso se puede diseñar un desarenador para evitar parte de la carga sólida que pueda transportar la corriente de agua.

Esta tipología de obra dispone, en algunas ocasiones, de un tomadero construido mediante hormigón, para evitar los deslizamientos de los muros de materiales suel-

tos, cuando se recolecta el agua, también en la zona donde da servicio dispone de una serie de compuertas con canales -a modo de cámara de llaves-para la distribución del agua.

Este tipo de obra se ve muy representado en la isla de Fuerteventura donde llegaron a ser del orden de 150 unidades con un almacenamiento de casi 3 hm³. Los problemas técnicos que presenta esta tipología de obras son los siguientes;

- Aterramiento y disminución de la capacidad útil.
- Muy baja calidad de aguas, alta salinidad, limitada en usos.
- Eutrofización.
- Bajo mantenimiento, roturas de muros.
- Roturas por grandes avenidas.
- Erosión de las pareces del vaso.
- Infiltraciones, permeabilidad.
- Elevada cantidad de sólidos en suspensión.
- Evaporación considerable (7-8 mm/d).



Figura 7.11; Charca de tierra en Fuerteventura. (Santamarta JC, 2011)

- Descartado su uso para abastecimiento, exclusivo de riego agrícola. En el caso de las charcas se suelen comprobar las siguientes características, principalmente en la isla de Fuerteventura, inicialmente se tiene el problema de la salinización del recurso almacenado. Como se ha comentado se aterran con mucha facilidad y hay pocos emplazamientos disponibles para este tipo de obra hidráulica. Además el agua también se saliniza por la evaporación.

3.4. Las balsas

En un terreno insular las balsas tienen como función, la regulación de los recursos hídricos disponibles para adecuarlos a las demandas, especialmente en el riego agrícola. Esta regulación se hace almacenando aguas superficiales captadas por barrancos cuando estos, por las lluvias, disponen de la misma, o bien aguas excedentes de las galerías.

Tabla 7.2; Grandes balsas en Canarias

ISLA	Nº DE BALSAS DE IMPORTANCIA
Tenerife	14
Gomera	2
Hierro	4
La Palma	6

Las balsas se diferencian de las presas en Canarias fundamentalmente por que las balsas no interceptan normalmente un curso de agua, con lo que no existe cuenca aportante, careciendo por tanto de avenidas. Es decir son un elemento de almacenamiento y regulación, no de captación, aunque en algunos casos están conectadas a barrancos próximos mediante conducciones para aprovechar el agua que interceptan los tomaderos.

A la hora de acometer la balsa se debe realizar las siguientes etapas;

- Fuente y transporte del recurso.
- Consideraciones generales de diseño de taludes, localización, capacidad, regulación demandada, líquido a almacenar.
- Estudios geológicos.
- Estudios geotécnicos.

En el diseño de la balsa de debe comprobar, desde el punto de vista de la seguridad de la estructura, el deslizamiento, la erosión del material y por último la degradación de la lámina.

Las características técnicas fundamentales de la balsa son las siguientes;

- Emplazamiento.
- Forma. Adaptación a la morfología del terreno.
 - Circular
 - Rectangular
 - Diamante
- Volumen de recurso hídrico almacenado. Oferta y demanda.
- Cota del fondo, presión hidrostática a la que está sometida la lámina.
- Altura de agua de explotación.
- Tipo de lámina impermeabilizante.
- Sistemas de anclaje de la lámina.
- Sistemas de drenaje.
- Tipo de tomadero.
- Sistema de explotación.
- Sistemas de control.

Un ejemplo de gestión de ese tipo de infraestructuras se tiene en la isla de Tenerife con el organismo público BALTEN (Balsas de Tenerife) que dispone de un patrimonio de 21 balsas, 1.150 km de conducciones de transporte, aducción y distribución, 19 pequeños azudes tomaderos para la captación de aguas superficiales, 3 pozos y una galería para captación de aguas subterráneas y 8 estaciones desaladoras (BALTEN, 2011).

3.4.1. Construcción de balsas

Una característica de las balsas que se puede tomar en cierta manera, como ventaja sobre las presas convencionales en Canarias es que la balsa se puede construir allí donde se necesite, con el condicionante de las posibilidades que de el terreno volcánico, como por ejemplo utilizar la orografía del territorio, accidentes, incluso los cráteres volcánicos. A diferencia de las balsas en el continente, que no captan agua, en Canarias, las balsas disponen de tomaderos que se construyen en barrancos cer-

canos con posibilidades de transportar aguas cuando llueve en la cabecera de los mismos, o bien disponer conducciones desde las galerías para el almacenamiento de su producción o más recientemente para el almacenamiento de aguas depuradas. Por esta circunstancia se hace necesario que existan elementos como los diques de retención de sedimentos y los desarenadores, para evitar que los acarreos de barranco entren en la propia instalación cuando el caudal proceda de esta fuente.

La partida movimiento de tierras en un proyecto de esta naturaleza suele representar un gran porcentaje del coste total de la balsa, por lo que es muy importante hacer un diseño óptimo para que este coste se minimice. Esto requiere llevar a cabo una serie de pruebas con diferentes ubicaciones y geometría de la balsa y, por tanto repetir los cálculos que esto supone.

La construcción de las balsas en los terrenos volcánicos se complica debido a la heterogeneidad del terreno volcánico que suele ser en algunos casos muy inestable. En este caso se debe hacer un número mayor de sondeos para estimar el comportamiento de los materiales donde se va a proyectar la balsa. Una de las cuestiones más importantes a la hora de la construcción de esta tipología de obras es la estanqueidad del vaso por que cualquier problema de fugas puede ocasionar graves colapsos y corrimiento de tierras en los materiales donde ocurran. Este es el caso acaecido en la isla de La Palma en el año 2011 donde estas fugas en un lateral de la balsa de Barlovento hizo que colapsara la balsa llevándose por delante cultivos de plataneras y perdiendo todo el recurso hídrico almacenado.

A la hora de diseñar la balsa existen unos elementos transversales a tener en cuenta, inicialmente, la balsa se construye con materiales sueltos, habrá que prever la disponibilidad del material en los emplazamientos donde se realice la infraestructura, sobre todo prever el material local necesario. En algunos casos en la cara interior del talud la base la conforma el *lapilli* o *picón*, este material presenta una granulometría muy uniforme, con tamaños comprendidos entre los 2,5 y 6 mm, la densidad baja, rozamiento interno elevado, superior a 30º y gran permeabilidad. Hay que tener mucha precaución con el material interno del talud, porque encima irán colocados los elementos y la lámina impermeabilizante, materiales con aristas vivas o bien un proceso de compactación pobre podría provocar un desgarró y le colapso de la estructura. Es interesante utilizar, para crear una base uniforme antes de colocar la impermeabilización arcilla compacta, cuyo espesor se puede aumentar en el fondo de la instalación.



Figura 7.12: Construcción de una balsa en Tenerife, tomadero. (Satocan SA)

Parte de la estabilidad de la balsa se consigue con una tipología constructiva, como una presa de materiales con unos taludes, que generalmente se diseñan de 2 a 2,5 H y 1,0 V. Cuando el talud del muro de cierre sobrepasa los 30 metros se debe hacer una berma horizontal, donde se suelen colocar los lastres para evitar que la lámina de impermeabilización se mueva, en una zona de la balsa se debe colocar también a efectos de mantenimiento una rampa de acceso al fondo, la balsa suele estar coronada con una pista de servicio que rodea al muro de anclaje de la lámina.

En la construcción de la balsa se intenta utilizar el material excavado para la propia construcción de los diques. El tomadero de la balsa se debe diseñar atendiendo a los caudales de entrada, comprobando la erosionabilidad de los mismos, en función de su cuantía, para la decisión o no de hacer una rampa de entrada de fábrica.

Las tomas de agua pueden ser varios tipos, aunque en Canarias las más utilizadas son las de fondo.

- De fondo.
- En torre (altas capacidades de embalse).
- Flotantes.

Los desagües de fondo se utilizan para poder vaciar y limpiar la balsa y en caso de emergencia que haga necesario vaciar la balsa rápidamente.

Los aliviaderos pueden ser de varios tipos pero se diseñan para caudales no muy elevados, se puede optar por la solución en tubos, canales o badenes.

Se debe cerrar perimetralmente la balsa para evitar el acceso de personas o animales, también como medida de seguridad conviene en los taludes plantear algún tipo de acceso en caso de emergencia, por caída accidental al vaso de la balsa.

En el fondo de la balsa se suele disponer un drenaje longitudinalmente a la misma mediante la *tipología espina de pescado* orientado hacia un sumidero. El desagüe de fondo se realiza mediante tubería de fundición. Existe también una cámara de llaves donde se regula la instalación y por último un aliviadero de la balsa. El agua embalsada puede provenir de varias fuentes, estas son;

- Aguas de tomaderos de barrancos, estructura que se estudió en apartados anteriores.
- Aguas procedentes de galerías, pozos o sondeos.
- Aguas procedentes de plantas desaladoras.
- Aguas procedentes de plantas depuradoras de aguas con sistema terciario para su reutilización (en Tenerife existe esta tipología).

Existen casos, que han resultado poco funcionales, en los que la balsa se ha construido en la traza de un barranco, esto a nuestro juicio constituye un error; debido al problema de las avenidas y los acarreo de barranco que hacen que la vida útil de esta infraestructura sea muy inferior a otras de similares características construidas fuera del barranco con sistema de tomadero. También el diseño y la construcción se complica sobremanera teniendo que recurrir a obras tipo pantallas de hormigón y aliviaderos sobredimensionados, un ejemplo de esta tipología de balsa está en la isla de Tenerife en la balsa de Aguamansa en el término municipal de La Orotava. Esta balsa es una Presa de Escollera con pantalla de hormigón armado en todo el vaso, dispone de un aliviadero con capacidad de 180 m³/s pero con una cantidad de recurso almacenado disminuido por la gran cantidad de sedimentos incorporados al embalse.



Figura 7.13; Balsa de la central hidroeléctrica de la isla de El Hierro. (Santamarta JC, 2012)

Aunque se ha comentado que, como norma general, el uso de las balsas es para suministro agrícola, existen casos donde se ha ejecutado una estructura que permite sostener una cubierta de la balsa; con vistas a una posible regulación del abastecimiento urbano en situaciones de emergencias. Esto es interesante a modo de versatilidad y utilidad que pueden llegar a tener este tipo de obras hidráulicas.



Figura 7.14; Balsa en Tenerife con cubierta para evitar evaporación y hacer posible su uso urbano. (Satocan SA)

3.4.2. Impermeabilización de balsas

Un aspecto crítico en el diseño de las balsas es la impermeabilización de la base; es donde generalmente se suelen dar mayores problemas técnicos ya que una mala ejecución o bien, el uso constructivo de un material de dudosa calidad hace fracasar la infraestructura.

Para el diseño de las balsas se suelen buscar formas geométricas, para facilitar la colocación de la lámina delgada. En general se suele usar en Canarias como sistema impermeabilizante el polietileno de alta densidad (PEAD), otros plásticos que se usan son el PVC, suele incluir en este caso una malla interna; el butilo, es excelente para este tipo de infraestructuras pero presenta la desventaja del coste. El espesor utilizado en las láminas es de unos 1,5 mm como norma general siendo el solapamiento entre láminas de 5 cm.

Las balsas, en Canarias, deben partir de la hipótesis de nulas pérdidas de agua, ya que una mínima pérdida, además del problema económico que supone perder agua embalsada, debido al coste del agua, puede provocar un lavado de materiales en la base, afectando a la estabilidad de la balsa, llegando a aumentar la rotura en la lámina de impermeabilización provocando finalmente el colapso de la balsa.

Inicialmente las impermeabilizaciones se hacían mediante muros de mampostería o bien con terrenos arcillosos, lo que suponía una limitación para la construcción de la balsa; al tener que existir este tipo de terreno en las proximidades de la explotación. Las láminas de impermeabilización aparecen en los años 60. Otras posibilidades para la impermeabilización de las balsas son la ejecución de la misma con hormigón (resisten más a la abrasión) y el asfalto. En el caso de las láminas han tenido un gran desarrollo tecnológico en Canarias.

La impermeabilización, como se ha comentado, además de no permitir fugas de caudal y resistir a las deformaciones; para evitar la erosión interna se recurre a los filtros y para proteger la lámina plástica se utilizan los geotextiles. Como se ha comentado generalmente para la impermeabilización de las balsas se hacen mediante láminas de plástico y geomembranas, para una calidad de la construcción se hace necesario que los materiales a usar dispongan del marcado europeo CE. Este marcado asegura que los valores y prescripciones técnicas declaradas por el fabricante de la lámina son vinculantes y por tanto, obligatorios.



Figura 7.15; Construcción de una balsa en Tenerife, impermeabilización de la lámina (Satocan SA)

La impermeabilización flexible se consigue mediante las geomembranas. En las impermeabilizaciones de asfalto y las de hormigón (no son muy habituales) hay que tener en cuenta los asentamientos diferenciales; finalmente indicar que en el caso del hormigón las grietas son críticas.

Bibliografía consultada y referencias

- AMIGÓ RODRÍGUEZ, E.; AGUILAR GONZÁLEZ E. (1994); *Manual para el diseño, construcción y explotación de embalses impermeabilizados con geomembranas*. Tenerife: Dirección General de Estructuras Agrarias. Consejería de Agricultura y Alimentación. Gobierno de Canarias. 221 p. ISBN: 84-86840-10-4
- BALTEN. (2008); 20 años de BALTEN. Ed.OAL-Balten.Tenerife.
- FARIÑAS, J. (2007); *Estudio experimental de obras de toma tipo Tirol*. 1º Ed. Tenerife: CICCP, 2007. ISBN 978-84-690-7778-8
- FERNANDEZ ORDOÑEZ, R.; ALONSO FRANCO M. (1982); La presa de El Siberio. Revista de Obras Públicas.
- GENERALITAT VALENCIANA, Conselleria de Medi Ambient, Aigua, Urbanisme i Habitatge (2009). Guía para el proyecto, construcción, explotación, mantenimiento, vigilancia y planes de emergencia de las balsas de riego con vistas a la seguridad. 247p.
- GONZALEZ GONZALVEZ, J. (2008); *Las grandes presas de Gran Canaria*. La cultura del agua en Gran Canaria. Cabildo de Gran Canaria. 43 p.
- GONZALEZ DE VALLEJO, L. ET AL. (2008); *Engineering Geological Properties of the Volcanic Rocks and Soils of the Canary Islands*. Soils and Rocks, São Paulo, 31(1): 3-13.

- SANTAMARTA CEREZAL, JC. RODRÍGUEZ J. (2008). *Singularidades de las obras hidráulicas para abastecimiento de agua potable en medios volcánicos. El caso del archipiélago Canario*. España. Congreso internacional sobre gestión y tratamiento del agua. Córdoba, Argentina.
- SANTAMARTA CEREZAL, JC. GONZÁLEZ GONZÁLEZ J. (2012). *Singularidades y evolución técnica de la ingeniería de presas en las Islas Canarias*. Revista de Obras Públicas .Nº 3530. Madrid.
- SANTAMARTA CEREZAL, JC. (2009). *Singularidades sobre la construcción, planificación y gestión de las obras y recursos hídricos subterráneos en medios volcánicos. Estudio del caso en las Islas Canarias occidentales*. Tesis (Doctoral), E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos (UPM) [En línea]. Universidad Politécnica de Madrid 2010, [ref. de 15 Octubre 2010]. Disponible en Web: <http://oa.upm.es/3389/>
- BRITO, W. (1995); *El Agua en Canarias y el siglo XXI*. Ed. Cabildo Insular de Gran Canaria. 129 p.



Construcción de Grandes Presas en las Islas Canarias

Jaime González Gonzalvez

1. Introducción

En las Islas Canarias se llegaron a construir más de 100 grandes presas entre 1900 y 1980. De todas ellas hay que destacar la presa bóveda de Soria en la isla de Gran Canaria (1.558 km²), que con sus 132 metros de altura ocupa en España el puesto número doce en la relación de las de mayor altura.

Ya en 1964 el Ingeniero de Vigilancia de Presas Manuel Alonso Franco recogía en un informe sobre el estado de las presas canarias que «el número de construcciones calificadas en la Instrucción como “grandes presas” era enorme dentro de Gran Canaria». También en la pequeña isla de La Gomera, donde se construyeron más de 18 grandes presas, se puede observar la labor gigantesca de los canarios para poder conseguir captar y almacenar el “oro líquido”, el agua. En Canarias la tierra es lo de menos, lo importante es el agua.

En Gran Canaria 65 grandes presas llegaron a superar los 15 metros de altura, aunque en la gran isla de las presas también existe un número muy elevado de proyectos que no llegaron a iniciar su ejecución. Muchas grandes presas se quedaron con una altura inferior a 15 metros. En la actualidad todavía se desconoce el número exacto de grandes presas en las islas de Gran Canaria y La Gomera.

La construcción de grandes presas en el archipiélago canario se inició antes de que se otorgasen las primeras concesiones en el año 1904 para las presas de San Lorenzo (Martín) y Pinto (la represa), ambas en Gran Canaria. La necesidad de contar con mayores caudales de aguas con destino a riegos, hacía que la excavación de cimientos, los primeros metros del muro y algunas obras accesorias (tomaderos, canales, tuberías, etc.) se realizaran antes de recibir la autorización de la Jefatura de Obras Públicas de la Provincia de Canarias. Los primeros reconocimientos finales fueron los de las presas del Pinto (1910) en Gran Canaria y de los Cocos (1912) en La Gomera. El primer incidente ocurrió a principios de siglo durante la construcción del muro de la Presa de San Lorenzo. Una grieta única y de fecha inmemorial.

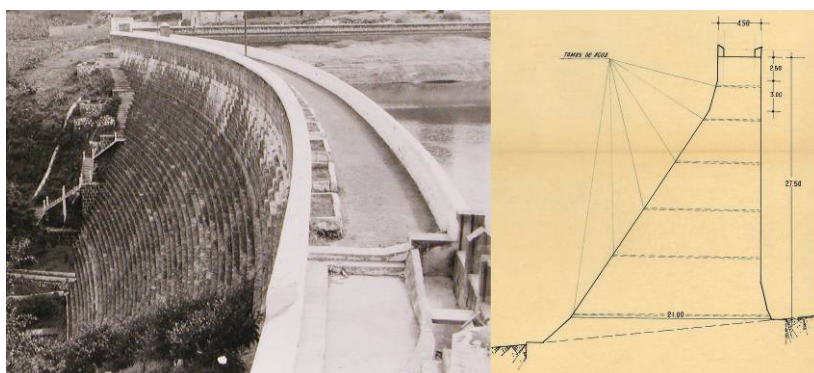


Figura 8.1; Pinto (*la represa*).

Lo imaginado y lo que finalmente se llegó a construir entre 1902 y 1980 en las 7 islas de rocas volcánicas, adquiere una mayor relevancia si recordamos lo que escribió el Ingeniero Juan León y Castillo en 1862, y con sólo 24 años, en el Proyecto de presas de mampostería en el Barranco de Tamaraceite para la formación de pantanos con destino a riegos: «si el ensayo produce estos favorables resultados, se animarán otros muchos a hacer obras semejantes en otros barrancos análogos que se encuentran en la provincia y cambiará la faz de sus costas hoy día incultas e improductivas. Sin duda alguna del éxito de esta empresa podrá nacer una nueva era para estas islas».

El perfil tipo de las 7 presas escalonadas en el Barranco de Tamaraceite estaba “equivocado”. Se trataba de un diseño similar al de algunas presas construidas en la primera mitad del siglo XIX en Francia. Un cuerpo de mampostería hidráulica con el talud de aguas arriba escalonado y más tendido que el de aguas abajo, que era casi vertical y liso. Como dicen los Ingenieros Díez-Cascón y Bueno en su obra *Ingeniería de Presas*: presas de fábrica, «sobre la idoneidad de este tipo de perfil basta seña-

lar que girada 180º, es decir con los taludes cambiados, su forma de trabajo hubiese sido mucho más adecuada».

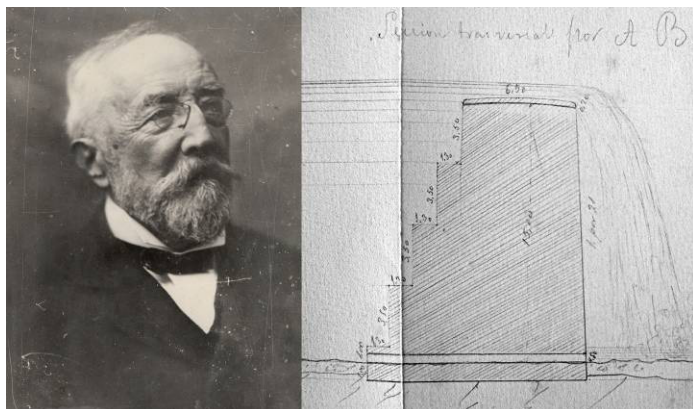


Figura 8.2; Juan León y Castillo. Perfil tipo “equivocado”.

Al final no se llevó a cabo el ensayo, aunque el joven Juan León y Castillo era un Ingeniero con visión de futuro, porque al final la nueva era comenzó en la primera década del siglo XX con el desarrollo de numerosos proyectos (San Lorenzo, Pinto, Los Cocos, Hormiguero, Casablanca, etc.) y el inicio de la construcción en Canarias de unas obras que son “algo más que unas estructuras”. Y los terrenos de la costa incultos e improductivos se convirtieron en bellos jardines.

2. Diseño y construcción de las presas canarias

Si el proyecto de la Presa de San Lorenzo del Ingeniero Juan León y Castillo ejerció una enorme influencia en los presistas de presas de fábrica pétreo hasta la década de los años 30, podemos asegurar entonces que la represa del Pinto fue la que marcó el camino a seguir por las otras heredades de aguas, las comunidades de regantes o los particulares, al ser la mayor obra hidráulica de las Islas Canarias durante muchos años. La explotación de esta obra de ingeniería ha sido un éxito durante más de 100 años, por eso mismo este viejo muro de mampostería de cal y todo el murete de mampostería hidráulica que recorre las márgenes del embalse forman una parte muy importante del patrimonio histórico de carácter hidráulico de Canarias.

En 1960, el Ingeniero Fernando Ascanio y Montemayor recogió en un informe sobre la estabilidad de la Presa de Hermigua (La Gomera) sus impresiones acerca de las modalidades que se acusaban en la construcción de presas de embalse en las dos provincias canarias. Su descripción de las particularidades que ofrecía la construcción de grandes presas en tres etapas se debía a las «magníficas cualidades de los terrenos de cimentación. Por lo tanto, en Canarias se había llegado a rebasar ciertos principios que en la Península se consideraban como básicos e intangibles».

2.1. Presas antiguas de mampostería con mortero de cal

El cuerpo del muro de la vieja Presa del Pinto fue construido de mampostería con mortero de cal. La impermeabilidad del paramento de aguas arriba se consiguió con un simple enlucido de mortero de cal y cemento porque suprimía las grietas de retracción de fraguado. La represa del Pinto constituyó un resonante éxito que hizo que numerosas comunidades de regantes, heredades de aguas y particulares se decidieran a construir grandes presas de embalse en las cabeceras de las fincas de plataneras de la costa Norte de Gran Canaria (presas de la Marquesa, Hormiguero, Cardoso, etc.).

Según Alonso Franco, como Ingeniero Encargado de la zona de Canarias de la Dirección General de Obras Hidráulicas (antigua Comisaría Central de Aguas), «las características generales de las presas antiguas de mampostería de cal en Canarias son la planta curva; la sección triangular con paramento agua arriba vertical y talud de agua abajo insuficiente para considerarla de gravedad pura; que muchas carecen de aliviadero y que hay una ausencia de drenaje de la fábrica, de galerías de visita y de desagüe de fondo; y que a pesar de que presentan una capacidad de embalse muy pequeño, tienen en general un gran número de tomas y una amplia galería transversal en su parte baja para la limpieza de sedimentos». En Canarias, algunos elementos como el escalonado del paramento de aguas abajo, y el talud en la zona inferior del paramento de aguas arriba, recuerdan los criterios y procedimientos de cálculo propios del último tercio del siglo XIX.

Por lo que respecta a los vasos, en casi todas las presas antiguas es común observar revestimientos parciales con mortero de cal y cemento. En los proyectos antiguos las reseñas geológicas por parte de los presistas eran escasas, pero en Canarias si el cauce era permeable se impermeabilizaba. Entre las viejas presas del archipiélago destaca por sus magníficas obras de revestimiento la gran Presa de Casablanca (Gran Canaria).

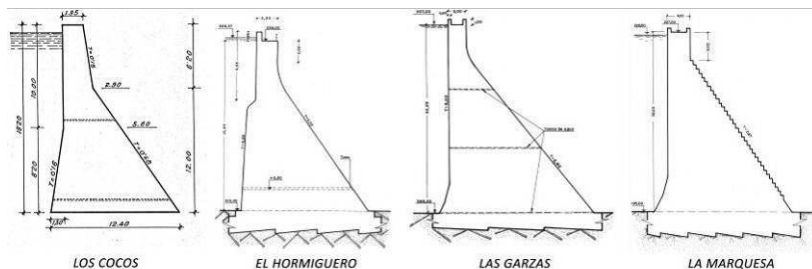


Figura 8.3; Presas antiguas.

Parece que el primer informe geológico de un especialista para la construcción de una gran presa fue redactado por el Catedrático de Geología Lucas Fernández Navarro en 1927. Se le encargó con miras a la construcción de la Presa de Cuevas Blancas en la cumbre de Gran Canaria, cuyo proyecto inicial era de 1905. Respecto a la cumbre central de la isla de las presas, Fernández Navarro escribió entonces que «tenía una estructura en masa predominante; mala tal vez para buscar en ella aguas subterráneas, pero excelente para contener sobre ella la superficial». Finalmente se construyeron dos grandes presas en lo alto de Gran Canaria. La Presa de los Hornos fue un éxito, Cuevas Blancas un fracaso, aunque la historia de su construcción es una de las más interesantes de toda Canarias.

Posteriormente, el Docteur en -sciences- Jacques Bourcart elaboró en 1933 el primer informe geológico de la cerrada donde finalmente se construyó la bóveda de Soria. Bourcart lo hizo para una presa de gravedad con planta curva de 90 metros de altura con cimientos. A pesar de estos dos informes antiguos, en las siguientes décadas muchos proyectos siguieron presentando reseñas geológicas exiguas.

Entre las impresiones aportadas por Ascanio y Montemayor sobre la construcción de presas en Canarias, destacan las tres razones fundamentales por las cuales «no se habían registrado fracasos en unas presas que estaban construidas sin ajustarse a las condiciones exigidas por aquel entonces». La primera de las razones era que «todas las presas antiguas habían sido cimentadas sobre potentes capas de basalto, traquita o fonolita, de gran compacidad, por lo que se evitaba así la subpresión que se presentaría en otros terrenos permeables». La segunda de las razones estaba en que «la iniciativa privada no había acudido a contratistas con medios auxiliares suficientes para terminirlas rápidamente. La construcción de estas obras de artesanía pétrea, por el contrario, había sido lenta, lo que dio lugar a que el mortero de cal tuviera tiempo suficiente para endurecerse al contacto prolongado con el aire». Y

por último, que «la ejecución del enlucido con mortero mixto, de cal y cemento, y no de cemento solo, produjo en las presas antiguas una impermeabilidad completa y duradera del paramento de aguas arriba».

El incidente de la Presa de San Lorenzo en el año hidráulico de 1903 – 1904 ocurrió cuando el agua almacenada en un muro en construcción con 12 metros de altura puso al descubierto una grieta importante en el terreno: única y de fecha inmemorial según escribió el Ingeniero Jefe de Obras Públicas que autorizó la concesión en 1904. El segundo incidente fue en marzo de 1988, cuando el agua volvió a poner al descubierto la vieja grieta natural. Parece que en el recrecimiento del muro primitivo en los años sesenta hasta los 28 metros no se tuvieron en cuenta los reconocimientos oculares practicados por los ingenieros de Obras Públicas de Las Palmas a principios del siglo XX. La grieta del terreno de principios de siglo pasó a ser en el Proyecto de Recrecimiento (1963) una mala cimentación de la presa primitiva.

Pero fue el 21 de febrero de 1934 cuando tuvo lugar en el término municipal de San Lorenzo (Gran Canaria) la rotura súbita de la Presa del Toscón, causando la muerte de 8 personas entre niños y adultos. Las aguas discurrieron violentamente por el barranco destruyendo por completo el Puente de La Hoya, de la carretera que desde Las Palmas conduce a la Villa de Teror, varias casas de mayordomos y algunas fincas de plataneras. Esta tragedia se la denominó entonces como la terrible Catástrofe del Toscón.

Los restos del muro, material que se halla a nuestro servicio, también forman parte de los bienes patrimoniales hidráulicos de Canarias. De la foto del perfil del muro, donde se aprecia un murete de coronación en el paramento de aguas arriba, se pueden extraer algunas conclusiones interesantes. Según el Diario Republicano Federal fue una catástrofe provocada por la codicia de quienes miden sus ingresos para el placer por el módulo que señala la entrada de agua en sus represas. Oro líquido.

2.2. Presas con mortero mixto de cal y cemento

La segunda etapa de construcción de grandes presas de embalse en Canarias surge cuando se comienza a emplear en el cuerpo de los muros de presa el mortero mixto de cal y cemento. La dificultad de adquirir el cemento necesario y la circunstancia de ser las cales de excelente calidad, fue lo que motivó que se empleara este aglomerante con carácter preferente. La Presa de los Pérez en Gran Canaria, con mortero

mixto hasta los 30 metros de altura y mortero de cal hasta coronación, fue por algunos años la más alta de las islas (45 metros sobre cauce).

Uno de los presistas más importantes en Canarias, el Ingeniero Julio Alonso Urquijo, explicaba en las memorias de los Proyectos que «el empleo del mortero mixto era para acelerar el fraguado de los morteros de cal en muros de gran espesor, además del aumento de resistencia». También escribió que «adoptaba el perfil ordinariamente usado de presa de gravedad, que debe resistir por su propio peso, exclusivamente, al empuje del agua. Pero que con tal base de cálculo era indiferente que los muros afecten en planta forma recta o curva, pero que siguiendo la práctica más autorizada prefería proyectarlos en arco circular, con lo que se obtenía además un factor más de seguridad». Esto explica por qué hay un número muy elevado de presas con planta curva en Canarias, especialmente en Gran Canaria. Sólo algunas viejas presas de mampostería fueron construidas con planta recta, aunque habían sido previamente diseñadas con planta curva (p.e., Cuevas de las Niñas).

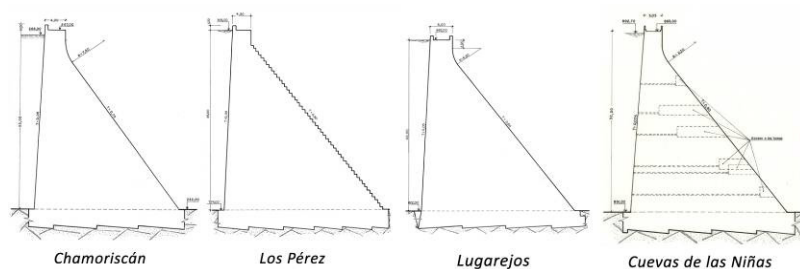


Figura 8.4; Muros de gran espesor.

Tras la construcción de la pequeña Presa de los Rajones en 1942 a modo de ensayo, comenzó en 1943 a construirse en lo alto del macizo de Tamadaba un muro de presa con arreglo al perfil tipo de presa de escollera a piedra prendida en el cuerpo de la misma y una pantalla de impermeabilización de mampostería hidráulica y enlucido con mortero bastardo. La Presa de Tamadaba dejó de construirse en 1954 a falta de un metro para su enrase. Esta presa tiene 17,70 metros de altura sobre cauce, 19,70 sobre cimientos y 163 metros de longitud de coronación por 6 de ancho. Un macizo de artesanía pétrea.

En 1950, los Ingenieros José María Valdés y Díaz Caneja, José Luis Fernández Casado y Manuel Lorenzo Blanc, como vocales de la Asesoría Geológica de Obras Públicas, realizaron una visita a Gran Canaria de cara a la construcción de la Presa del Caide-ro de la Niña en el barranco más importante, con gran diferencia, de todas las Islas

Canarias. Esta visita al Barranco de la Aldea se realizó para dictaminar acerca de las condiciones del terreno donde se iba a construir una presa de embalse que iba a convertirse en un ejemplo bien claro de los beneficios indirectos y cuantiosos que producía en un país una obra bien concebida de aprovechamiento hidráulico. Con la construcción de la presa no sólo se pretendía extender notablemente las tierras de cultivo y mejorar las comunicaciones de la Aldea de San Nicolás con el exterior, mediante la construcción posterior de un “puertito” o el “acondicionamiento o sustitución de la pista del Andén Verde”, sino las del efectivo saneamiento del pueblo al regular y atenuar las avenidas impetuosas del barranco. La situación sanitaria era verdaderamente lamentable debido a que las charcas del barranco eran la causa de un paludismo endémico y la propagación de las infecciones tíficas. La mortalidad infantil alcanzaba la proporción del 40 por 100.

En 1964 el Ingeniero Manuel Alonso Franco destacó que «la Presa del Caidero de la Niña se apartaba de la construcción clásica de presas en Canarias porque respondía a una concepción más moderna». Así, su fábrica era de hormigón en masa con aglomerante de cemento Portland (hormigón mampostead), tenía juntas transversales de contracción y tres galerías longitudinales de visita e inspección. Su aliviadero de labio fijo tiene tres vanos y está situado en el centro de la presa, dotado de trampolín de lanzamiento. Esta gran presa es de tipo gravedad de planta recta y altura sobre cauce de 46,40 metros.

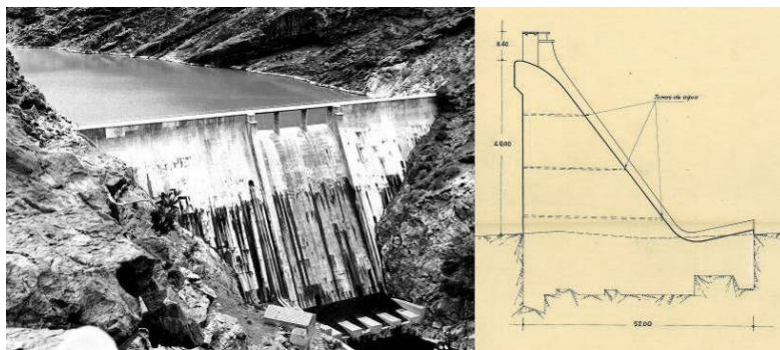


Figura 8.5; Caidero de la Niña.

En un informe con fecha de 1962, sobre un proyecto de tres presas escalonadas para el almacenamiento de las aguas procedentes del Túnel de Tejeda (Gran Canaria), el Ingeniero José Luis Fernández Casado desconfiaba del hormigón ciclópeo porque «repetidas veces había visto como se convertía en una mala mampostería hormigonada que casi podía calificarse de mampostería en seco».

Entre 1902 y 1961 se habían construido en Gran Canaria 41 grandes presas de mampostería. La responsable principal de este elevado número de grandes presas era la platanera, la gran consumidora de agua. En segundo lugar quedaba el abastecimiento de la ciudad de Las Palmas y del Puerto de la Luz. Ahora bien, el número de grandes presas construidas en Gran Canaria en sólo 60 años, adquiere más importancia cuando lo unimos al número de estanques (unos 5.000), pozos (unos 800 con 78 km de perforación), galerías (unas 420 con 140 km), de canales o túneles de transvase (153 km) y de tuberías de distribución (534 km). Numerosas empresas hidráulicas que dicen mucho a favor de la laboriosidad insular, especialmente de la iniciativa privada.

En la década de los sesenta no sólo se terminaron muchas presas de mampostería con mortero bastardo (cal y cemento) cuyas obras se habían iniciado en las décadas anteriores, sino que se comenzó en 1962 la construcción de la presa bóveda de Soria (hormigón) y se construyeron algunas presas de mampostería empleando únicamente mortero de cemento, pantalla de hormigón y conductos de drenaje. Había una gran tradición en las islas en la construcción de presas de mampostería, especialmente en Gran Canaria.

Hacia 1964 en La Gomera se habían construido 7 grandes presas antiguas por los particulares y 7 presas por parte de los Servicios Hidráulicos. Las presas privadas con planta curva y mampostería de cal, las más modernas con planta recta y mampostería con mortero de cemento. Todas sin drenaje en su cuerpo y cimentación.

Según los informes de 1964 de Alonso Franco (Sección de Vigilancia de Presas), «en todas las presas de mampostería en Canarias es de presumir que la densidad de sus fábricas tiene un valor relativamente bajo. No creemos que sea una exageración pensar que muchas de estas fábricas tienen densidades que pueden oscilar desde 2,10 a 2,25 Tn/m³». «Una hipótesis más favorable que la posible» dijo el Ingeniero José Luis Fernández Casado.

El estudio realizado entre 1970 y 1971 por el Ingeniero José Sáenz de Oiza sobre el estado de la Presa de las Cuevas de las Niñas dio como resultado una densidad muy baja de la fábrica, inferior a 2,0 Tn/m³ y próxima a 1,8 Tn/m³. Tras una visita a Canarias, el Ingeniero Federico Macau Vilar (SGOP) escribió en una carta «la Cueva de las Niñas no me gustó nada». Sigue siendo el único modelo a escala real para el estudio teórico de la estabilidad de otras presas del Archipiélago Canario.



Figura 8.6; Presa de Hermigua (La Gomera).

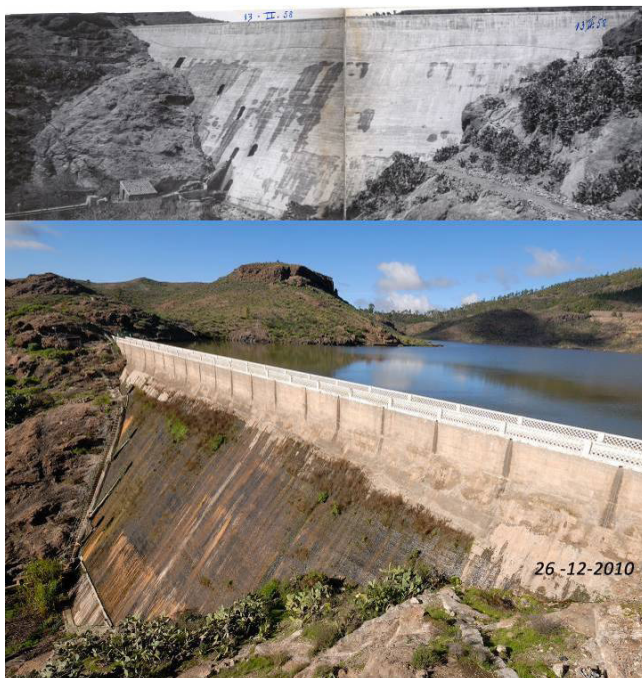


Figura 8.7; Cuevas de las Niñas en 1958 y en 2010. **Figura 8.6;** Presa de Hermigua (La Gomera).

El Ingeniero de Caminos Fernando Sáenz Ridruejo dice que a raíz de los informes de 1964, en que Alonso Franco revisó sus condiciones de seguridad, todas esas presas entraron en un camino de racionalidad. Efectivamente, el primer juicio crítico de la estabilidad de las grandes presas de mampostería construidas en Canarias, por parte de los maestros de presas Fernández Casado y Alonso Franco, influyó mucho en el desarrollo de algunos proyectos de grandes presas, así como en la construcción posterior de las presas de hormigón mamposteadas con paramentos acabados en hormigón (Parralillo, Gambuesa o Fataga por parte del Cabildo Insular de Gran Canaria). Pero fue más determinante para los recrecidos con fábrica de mampostería en presas antiguas, por la ayuda que el Estado concedía a los propietarios. Un buen ejemplo lo constituyen los recrecimientos de las presas de San Lorenzo o la Umbría, ambas en Gran Canaria. En cambio, en la Presa del Mulato el recrecido fue con hormigón.

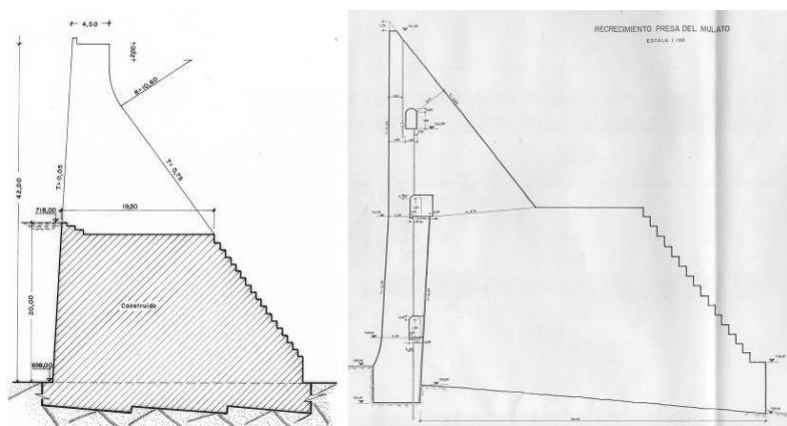


Figura 8.8; El Mulato.

A tenor de los proyectos y obras de recrecimiento en algunos muros de embalse, y por la ausencia de galerías de visita, de drenaje de la fábrica y de desagüe de fondo en las presas construidas con mortero de cal o bastardo con mampuestos con una densidad reducida, los Ingenieros en Madrid plantearon en 1966 que «la Administración debía de sentirse preocupada por la seguridad de todas las construcciones con fábricas de mampostería, especialmente en Gran Canaria y La Gomera por el número elevado de presas que entraban en la clasificación de Grandes Presas». La solución general propuesta entonces por Vigilancia de Presas fue la de que «el Estado debía hacerse cargo de su garantía estructural, corriendo a cargo de los gastos

de auscultación y refuerzo necesario en aquellas obras cuya propiedad careciera de recursos y de personal técnico idóneo».

2.3. Presas modernas

En 1972 finalizaba la construcción de la magna Presa de Soria (1959), una cúpula de doble curvatura de 132 metros sobre cimientos. Fue la iniciativa privada la que logró construir la única presa bóveda de Canarias, en una cerrada donde el Cabildo Insular de Gran Canaria había proyectado con anterioridad una presa de gravedad con planta curva de 90 metros de altura con cimientos (1930) y una presa bóveda de hormigón hidráulico de pared delgada de 70 metros de altura con cimientos (1935).



Figura 8.9; Presa de Soria.

Hubo un proyecto del Ingeniero Saturnino Alonso Vega para construir otra presa bóveda en Gran Canaria, en una cerrada del Barranco de Siberio (1968). La altura sobre cimientos era de 78,50 metros, mientras que la coronación tenía una longitud de 190 metros con un ancho de 5. Su volumen de embalse era de 4.800.000 m³.

En 1972 la bóveda gruesa fue adjudicada a la empresa Dragados y Construcciones, cuyo delegado en Canarias era el Ingeniero Emilio Benítez Pascual, pero finalmente se elaboró un proyecto reformado en 1973 que definía una solución de presa de es-collera con pantalla asfáltica en el paramento de aguas arriba y trasladaba la cerrada

inicial unos 300 metros aguas abajo. Finalizada en 1978, su puesta en carga ocurrió de forma súbita durante el temporal extraordinario del mes de enero de 1979.

La tradición oral recoge que la presa de mampostería seca de Tamadaba se vació tras su primera puesta en carga. La repararon inmediatamente. A la Presa de Siberio le ocurrió lo mismo en 1979, tras la rotura inicial del plinto por su escaso dimensionamiento y su mal empotramiento. La estructura fue reparada mediante actuaciones que se prolongaron hasta 1984.

También se construyeron durante la tercera etapa algunas presas de hormigón, como la Encantadora en La Gomera (gravedad) o la de Aríñez en Gran Canaria (contrafuertes), aunque por aquellos años Vigilancia de Presas puso más empeño en el diseño y construcción de presas de materiales sueltos. Dice Alonso Franco que «en Canarias se les negaba su oportunidad bajo la creencia de que el talud de su paramento mojado restaba capacidad a la ya exigua de sus vasos». Ya dijimos al principio que en Canarias la tierra es lo de menos, lo importante es el agua.

La mayoría de las grandes presas de materiales sueltos construidas en Canarias son de escollera con una pantalla en el paramento de aguas arriba. Así, en la isla de La Gomera se construyeron las presas de Amalahuigue y Mulagua, ambas del Cabildo Insular. Pero en Gran Canaria se construyó en la embocadura de la Caldera de Tirajana una escollera con núcleo central. Los proyectos primitivos para construir una gran presa en la cerrada del Barranco de Tirajana habían sido de gravedad.

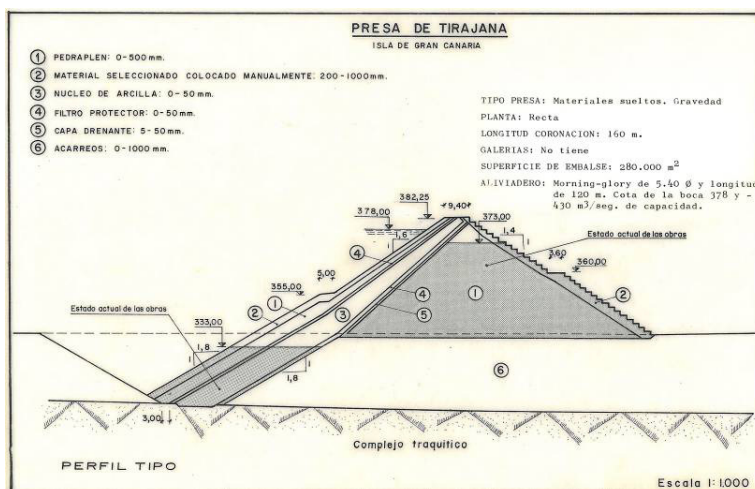


Figura 8.10; Presa de Tirajana.

En el magnífico artículo Utilización de materiales pliocuaternarios en presas de materiales sueltos (1976), los Ingenieros Gómez Laá, Alonso Franco y Romero Hernández resaltaron que «Tirajana es una presa de escollera que aprovecha la plana aluvial para espaldones y un coluvión arcilloso procedente de los basaltos, para la impermeabilización». En uno de los libros del Ingeniero José Luis Fernández Casado se puede leer lo siguiente: éxito (hay pocos comentarios) observar que el núcleo es central, TIRAJANA.

3. Patrimonio Histórico de Canarias

Dice el antiguo Catálogo Oficial de las presas de embalse con altura superior a los 15 metros del Ministerio de Obras Públicas (1962), que «España es uno de los países con más antigua tradición en obras de presas». También dice que «de las 283 grandes presas en explotación a finales de 1961, 48 han sido catalogadas en las Islas Canarias, cifra ésta más que suficiente para calibrar la importancia de las obras realizadas en esa parte de la España Insular».

Al observar la relación de las 48 presas construidas en Canarias entre los años 1902 y 1962, a la que habría que sumarle, entre otras, las presas del Hormiguero y la del Toscón (Granadilla) por su rotura en 1934, recordamos en seguida las palabras que Joaquín Amigó nos dejó en 1953: «viajero, cuando vayas por nuestras carreteras y contemples esos campos cultivados, piensa por un momento en lo que ha costado obtener el agua para regarlos y que eso del aplatanamiento de los canarios es una leyenda inventada por quienes no nos conocen, aunque nosotros, modestamente, la explotamos».

Si como dijo el Ingeniero Federico Macau Vilar en su magnífico libro El Problema Hidráulico Canario (1960), «el agua es en cualquier parte de la tierra uno de los factores esencialmente vitales; su abundancia o su escasez definen formas determinadas de vivir y de carácter, no sólo hace variar el paisaje, sino también el nivel de vida, el tipo y desarrollo de los métodos de la Agricultura y de la Industria, e incluso la manera de ser y de pensar de los hombres»; podemos entonces pensar y decir que en la diversidad del paisaje canario las grandes presas de mampostería ciclópea no sólo son las grandes obras hidráulicas de Canarias, sino que también son los grandes elementos patrimoniales históricos y culturales de aquella antigua forma de hacer agricultura. Como dijo el presista Alfonso Cañas Barrera en 1961, «elevada casi al rango de la jardinería».

En el siglo XXI no sólo debemos reconocer los notorios valores históricos que tienen las presas canarias, sino efectuar una importante revisión del estado en que se encuentran, especialmente las presas de mampostería. En el pasado los ingenieros de Vigilancia de Presas dijeron sobre Canarias que la administración debía de sentirse preocupada. Ahora seguimos teniendo administración pero lo que no tenemos es Vigilancia de Presas.

Bibliografía consultada y referencias

- DÍEZ-CASCÓN SAGRADO, J., BUENO HERNÁNDEZ, F. Ingeniería de Presas: presas de fábrica. Universidad de Cantabria. Santander, 2001
- GONZÁLEZ GONZÁLVEZ, J. La Presa de Cuevas Blancas en la cumbre de Gran Canaria: proyectos, cimientos, sondeos y cemento (1905 - 1971). "El conocimiento de los recursos hídricos en Canarias cuatro décadas después del proyecto SPA-15. LPGC, 2011
- GONZÁLEZ GONZÁLVEZ, J. Construcción, recrecido e incidente de la Presa de Martínón (San Lorenzo) Gran Canaria (1902 - 1988), 2009
- GONZÁLEZ GONZÁLVEZ, J. Construcción de la Presa de las Cuevas de las Niñas en Majada Alta. Gran Canaria (1930 - 1958), 2008
- GONZÁLEZ GONZÁLVEZ, J. Siete presas, nueve estanques y una tubería. Cortijo de Samsó - Tamadaba. Gran Canaria (1907 - 2009), 2009
- GONZÁLEZ GONZÁLVEZ, J. XYZT Presa de Chira. De presa de derivación a presa de embalse. Gran Canaria (1930 - 1964) (Pendiente de publicar)
- GONZÁLEZ GONZÁLVEZ, J. La Presa de las Cuevas de las Niñas en Majada Alta. Construcción, estabilidad, obra y terreno. Gran Canaria, (1930 - 2009), 2009
- GONZÁLEZ GONZÁLVEZ, J. Presa de Soria. Una historia de proyectos, informes y notas informativas. Gran Canaria (1935 - 1972), 2010
- SÁENZ RIDRUEJO, F. Manuel Alonso Franco: maestro de presas. Revista de Obras Públicas, Nº. 3509 (Ejemplar dedicado a: Brasilia 2009: XXIII Congreso Internacional de Grandes Presas), págs. 99-102, 2010
- SALDAÑA ARCE, D. Presas de mampostería en España, 2011



La infiltración en suelos volcánicos

Jonay Neris Tomé

Marisa Tejedor Salguero

Carmen Concepción Jiménez Mendoza

1. Introducción

En el archipiélago canario el agua es un recurso de extraordinario valor y de difícil disponibilidad en algunas islas. El incremento de la extracción de aguas subterráneas, la escasez de aguas superficiales y el aumento del consumo, han llevado en algunos casos a una sobreexplotación de los acuíferos y a una reducción de su calidad. Estas circunstancias han motivado la búsqueda de nuevas fuentes, principalmente mediante procesos de desalación y depuración. En la isla de Tenerife el 89% del agua procede de fuentes convencionales, siendo el 87% del total extraída de recursos subterráneos (principalmente galerías y pozos) y el 2% de recursos superficiales y manantiales (Consejo Insular de Aguas de Tenerife, 2004). Esta situación pone de manifiesto la importancia que tiene la recarga del acuífero de la isla por ser la principal fuente de agua de consumo. Por ello es de gran interés profundizar en el conocimiento del ciclo hidrológico en general, y del proceso de infiltración del agua en el suelo en particular (figura 12.1).

La infiltración se define como la entrada del agua a través de la capa superficial de la corteza terrestre, es decir del suelo. La relación entre el aporte de agua (lluvia, riego, etc.) y la infiltración determina la proporción de la primera que penetra y puede moverse hacia estratos profundos, y la que queda en superficie disponible para la escorrentía. Por ser la interfase entre la atmósfera y el material geológico, el suelo juega un papel fundamental en el ciclo hidrológico pues la infiltración se produce a

través de él. En este sentido, las propiedades edáficas como la porosidad, estructura, textura, etc., son de especial relevancia en este proceso. La naturaleza volcánica de las Islas Canarias contribuye, entre otros factores, a la formación de algunos suelos con propiedades muy peculiares en cuanto a su mineralogía, que se traducen en un comportamiento característico ante la infiltración. Su conocimiento es por tanto fundamental para la planificación de un recurso tan escaso en la isla como el agua.



Figura 9.1; El ciclo del agua. (U.S. Geological Survey, 2011)

2. Factores que influyen en la infiltración del agua en el suelo

En el proceso de infiltración influyen tanto las características del suelo como de la lluvia, además de otros factores externos capaces de modificarlas (figura 9.2).

El suelo se forma a partir de la alteración de un material que puede ser una roca consolidada, un depósito no consolidado o, incluso un suelo ya existente. Es un sistema trifásico (fases sólida, líquida y gaseosa) donde la fase sólida es la que ocupa un mayor volumen. Esta fase está formada por partículas elementales que se agregan constituyendo una estructura porosa tridimensional en la que pueden penetrar tanto el aire como el agua (Hillel D, 1980). El volumen, pero también la distribución y continuidad de los poros del suelo, determinan en última instancia la capacidad de infiltración del mismo, puesto que son el medio a través del cual se mueve el agua.

La conformación de la porosidad del suelo está dominada por propiedades como la textura (el comportamiento del suelo resultante de la actividad de sus distintas fracciones granulométricas), el desarrollo de la estructura (la forma y fuerza con que las partículas sólidas se ordenan) o la mineralogía del suelo.

En general, las texturas finas favorecen la formación de estructuras más compactas y menos porosas, disminuyendo la conductividad hidráulica y la velocidad de infiltración. En este sentido, Helalia (1993) indica que existe una alta correlación negativa entre el contenido de arcilla y la velocidad de infiltración básica cuando el suelo tiene una textura arcillosa. Sin embargo, los suelos de texturas finas muestran una elevada capacidad de retención de agua y de contracción al secarse. Por este motivo pueden presentar en los momentos previos a la saturación un elevado gradiente hidráulico y la presencia de canales de flujo preferencial que implican una alta velocidad de infiltración. La textura también tiene influencia sobre la estabilidad estructural del suelo. La abundancia de arcillas implica una mayor cohesión de las partículas del suelo ante el impacto de las gotas de lluvia (Lado M *et al.*, 2004). Sin embargo, la abundancia de estas partículas se relaciona también la prevalencia de procesos de destrucción de la estructura por humedecimiento rápido. Es decir, los agregados del suelo, cuando son sometidos a un proceso de humectación como el producido por la lluvia, tienden a humedecerse y expandirse a diferente velocidad, a sufrir presión de los gases acumulados en su interior y a variar rápidamente su temperatura, soportando así un estrés que puede desembocar en la destrucción de la estructura (Emerson WW, 1977; Kay BD, Angers DA, 1999; Lado M *et al.*, 2004).

Desde el punto de vista de la estructura, los suelos con estructuras compactas y menos desarrolladas presentan menor porosidad y, por lo tanto, menor velocidad de infiltración que los suelos de estructura más suelta y desarrollada. Por otro lado, los suelos con baja estabilidad de sus agregados son propensos al colapso estructural y a la aparición de fenómenos de sellado y encostramiento, que consisten en la oclusión del espacio poroso por el material fino disperso y que disminuyen la infiltración.

La mineralogía de las arcillas participa igualmente en la formación de la estructura y condiciona su estabilidad. El valor de floculación de las arcillas es determinante en la susceptibilidad a la dispersión y ruptura de los agregados del suelo y, por lo tanto, en la limitación de la infiltración por la oclusión de los poros. Por otro lado, la presencia de arcillas del grupo de las esmectitas (presentes en Vertisoles y algunos Aridisoles de Tenerife) tiene importantes implicaciones hidrológicas debido a su capacidad de hinchamiento al aumentar la humedad del suelo. Los ciclos de expansión-retracción característicos de estas arcillas tienen su expresión en la estructura

con la formación de grietas que suponen canales preferentes para la infiltración del agua cuando el suelo no está saturado (Ben-Hur M *et al.*, 1998). A medida que el suelo se humedece, la expansión de las arcillas se traduce en la desaparición de las grietas y la disminución de la porosidad del suelo y, como consecuencia, en una reducción de la infiltración (Ben-Hur M *et al.*, 1998).

Los productos de ordenación de corto alcance (POCA) típicos de algunos suelos volcánicos (Andisoles) juegan un papel relevante en la formación y estabilización de la estructura porosa (Nanzzy M *et al.*, 1993). Se trata de productos criptocristalinos cuya fracción coloidal es muy específica y entre los que destacan la alofana, imogolita y ferrihidrita. De la misma manera actúan los complejos organominerales alúmino-humus presentes en estos suelos. Rodríguez Rodríguez A *et al.* (2002) profundizan en este aspecto y señalan que la presencia de productos de este tipo supone la formación de estructuras bien desarrolladas y estables. El mismo papel estabilizador de la estructura del suelo ha sido atribuido tradicionalmente a la materia orgánica (Porta J *et al.*, 2003). Se comporta como agente cementante entre las partículas primarias de los agregados, y aumenta su estabilidad ante los procesos de humectación (Emerson WW, 1977). Como consecuencia, los suelos con un mayor contenido en materia orgánica y productos de ordenación de corto alcance presentan una estructura más desarrollada y estable, circunstancia que facilita el proceso de infiltración de agua en el suelo (Nanzzy M *et al.*, 1993). Otras propiedades como las acumulaciones secundarias de carbonatos y yeso, o la presencia de óxidos actúan también como elementos estabilizadores de la estructura edáfica.

El estado salino-sódico del suelo influye en su estabilidad estructural al intervenir en los procesos de floculación-dispersión. La presencia de sales solubles con cationes de elevada relación carga/diámetro hidratado (calcio, magnesio, etc.) supone la prevalencia de los procesos de floculación y, por lo tanto, el mantenimiento de una estructura estable (Shainberg I, Letey J, 1984). Por el contrario, la presencia de cationes con una baja relación carga/diámetro hidratado, como es el caso del sodio, implica el predominio de los procesos de dispersión que permiten la movilización de partículas. Aparecen en este caso los fenómenos de sellado y encostramiento y, en consecuencia, una disminución de la infiltración del agua en el suelo (Ben-Hur M *et al.*, 1998).

Otras propiedades edáficas como la repelencia al agua tienen especial importancia en el balance aporte-entrada de agua en el suelo. La repelencia al agua o hidrofobilidad se define como la reducción de la afinidad entre el suelo y el agua, y se manifiesta como una resistencia al humedecimiento. Su presencia en los horizontes

superficiales del suelo puede por ello suponer una disminución de la infiltración (Doerr SH *et al.*, 2000).

Las características de la lluvia afectan también al proceso de infiltración. En este sentido destacan la intensidad, el tamaño y la velocidad de las gotas de lluvia. Estas propiedades son determinantes en su energía cinética e influyen en su capacidad para destruir la estructura del suelo y provocar procesos de sellado. El comportamiento del suelo ante el impacto de las gotas de lluvia es función de factores como la energía cinética de la misma, la protección del suelo por la vegetación y la estabilidad de sus agregados. Por otro lado, la composición química del agua de lluvia tiene implicaciones en la estabilidad estructural del suelo. Su bajo contenido en sales puede provocar fenómenos de dispersión y formación de un sello superficial con la consecuente disminución de la porosidad del suelo (Agassi M *et al.*, 1981).

Por último, dentro de los factores ambientales que afectan a la infiltración es imprescindible señalar por su importancia la pendiente del terreno, la cobertura vegetal y el uso y manejo del suelo. La pendiente afecta al balance aporte de agua-infiltración. En general, un aumento de la pendiente supone una disminución de la infiltración del suelo por el descenso de la capacidad de almacenamiento del agua en su superficie, de la presión por encharcamiento (Fox DM *et al.*, 1997) y del tiempo de permanencia del agua sobre el suelo (Sharma KD *et al.*, 1983). Otro de los factores que afecta a la infiltración es la cobertura vegetal. Por su posición respecto a la superficie del suelo, tiene implicaciones directas en la interceptación y retención del agua de lluvia impidiendo su llegada al suelo y en los procesos de impacto de gota y salpicadura (Molina A *et al.*, 2007). El uso del suelo y la eliminación de la cobertura vegetal con fines de aprovechamiento agrícola y/o ganadero afectan a muchas propiedades que a su vez están relacionadas con la infiltración del agua. Estas prácticas suponen la disminución de la protección del suelo ante el impacto de las gotas y, por lo tanto, un aumento de la susceptibilidad ante los procesos de sellado y encostramiento (Poulenard J *et al.*, 2003). Además, este tipo de prácticas modifica el balance aporte-humificación-mineralización de la materia orgánica en el suelo. El resultado es una disminución de su contenido con las repercusiones que ello tiene en otras propiedades como la estructura del suelo y su porosidad (Nanzzyo M *et al.*, 1993). Por otro lado, las técnicas agrícolas y de pastoreo suponen en la mayoría de los casos una alteración mecánica de la agregación del suelo y su porosidad, bien por la acción del peso de la maquinaria o el pisoteo de los animales (Molina A *et al.*, 2007). Esto se traduce en la compactación del mismo y la disminución del espacio poroso (Bateman HP, 1963), sobre todo en el caso de suelos con un contenido de humedad cercano a la saturación (Akram M, Kemper WD, 1979).

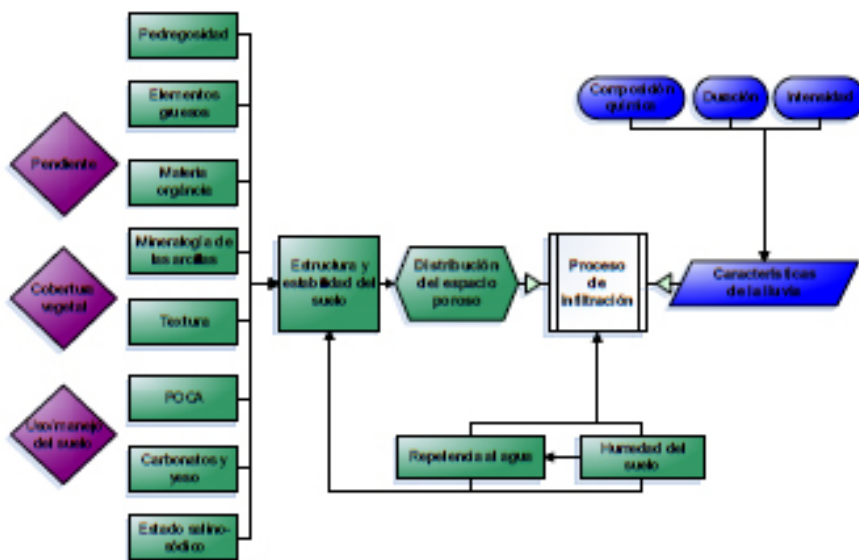


Figura 9.2; Factores que influyen en el proceso de infiltración.

3. Características de los suelos de Tenerife

La gran variabilidad de factores ambientales (climáticos, litológicos, cronológicos, topográficos y de vegetación) existentes en la isla de Tenerife se traduce en una gran diversidad de tipos de suelos (Fernández Caldas E *et al.*, 1982). Se han descrito 7 órdenes de suelos en Tenerife utilizando como sistema de clasificación la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999).

3.1. Andisoles

Son los suelos más típicos de las regiones volcánicas. Su composición mineralógica, que condiciona en gran medida sus propiedades, es consecuencia de las características peculiares del material de origen. Su fracción coloidal es muy específica y está dominada por productos de ordenación de corto alcance, vidrio volcánico o complejos organominerales.

Dependiendo del predominio de estos componentes se diferencian dos grupos reflejo de su grado de evolución. Hay que entender en todo caso que los Andisoles son suelos jóvenes, y aún en las mejores condiciones de clima, material de origen, vegetación, etc., pierden las características que los definen en alrededor de 8.000-9.000 años. Los Andisoles más evolucionados (alofánicos y organominerales) se caracterizan por tener una retención de fosfato elevada, baja densidad aparente y un elevado contenido de productos de ordenación de corto alcance, lo que repercute en su elevado desarrollo estructural. Por su mineralogía la superficie específica y la retención de humedad son elevadas. Los Andisoles más jóvenes (víticos) tienen un porcentaje significativo de fracción arena ($\geq 30\%$), menor retención de fosfato, menor contenido de productos de ordenación de corto alcance y un elevado porcentaje de vidrio volcánico. La evolución de estos suelos depende de las condiciones ambientales. En medio húmedo tienden hacia Andisoles alofánicos, mientras que en un medio árido evolucionan hacia otros suelos.

En cuanto a su distribución en la isla, los Andisoles alofánicos están asociados a zonas húmedas, exclusivamente en la vertiente norte de la isla en la franja de condensación del alisio y sus proximidades (figura 9.3). Sólo en algunos núcleos de rebose de la nube en la parte alta de la vertiente sureste se describen también, aunque ya con un porcentaje importante de arcillas mineralógicas. Los Andisoles organominerales se han identificado también en la zona más húmeda de la vertiente norte, pero sobre materiales más antiguos. Por el contrario los Andisoles víticos tienen una distribución bastante más amplia al estar asociados fundamentalmente a la presencia de materiales de origen de edad reciente.

3.2. Vertisoles

Los Vertisoles son suelos arcillosos (30% o más de fracción arcilla) con una mineralogía dominada por arcillas expansibles tipo montmorillonita. Estos silicatos son capaces de expandirse y contraerse en función del contenido de humedad del suelo. El movimiento que se produce en la masa del suelo por los procesos de dilatación-contracción, hace que muestren unas formaciones singulares denominadas caras de deslizamiento y que tengan un perfil muy homogéneo. Este tipo de suelo es localmente conocido como “mazapé” y se utilizaba tradicionalmente como aislante en depósitos de agua dada su baja permeabilidad en estado húmedo.

Se localizan en ambas vertientes de la isla aunque a cotas distintas, sobre materiales antiguos y frecuentemente de carácter coluvial. De forma general se sitúan en la

vertiente septentrional por debajo de 350 m.s.n.m. y en la meridional entre 600 y 1200 m.s.n.m. (figuras 12.3 y 12.4). Al ser zonas ampliamente antropizadas y/o erosionadas, sólo quedan reductos de estos suelos en Tenerife.

3.3. Aridisoles

Los Aridisoles son suelos asociados a condiciones áridas. Si bien dentro de este orden hay una amplia casuística, hay algunos aspectos comunes a todos ellos entre los que destaca desde el punto de vista hidrológico la fragilidad de su superficie consecuencia de la inestabilidad de sus agregados. Esto es debido principalmente a su bajo contenido en materia orgánica, pH, conductividad eléctrica y porcentaje de sodio intercambiable elevados, además de su textura dominada por las arcillas. El impacto de las gotas de lluvia contra el suelo desnudo da lugar a la formación de sellos y costras superficiales que reducen la infiltración del agua en estos suelos.

Los Aridisoles ocupan una importante superficie en la vertiente meridional de la isla, alcanzando altitudes muy variadas dependiendo de la orientación, llegando a 600/700 m.s.n.m. en el sur/suroeste. En la vertiente norte su representación está muy limitada, con sólo algunos núcleos en la franja costera a altitudes inferiores a 200/300 m.s.n.m.

3.4. Alfisoles

Se trata de suelos que presentan un horizonte de acumulación de arcillas (horizonte argílico). Esta acumulación es consecuencia de un lavado y no de la alteración *in situ* del material. Por ello, este horizonte muestra claras evidencias del movimiento de estas partículas finas como las películas de arcilla que rodean los agregados y tapizan los poros. Para alcanzar los porcentajes de acumulación de arcilla necesarios hace falta tiempo. Por ello la mayoría de los Alfisoles se encuentran en paisajes relativamente antiguos.

En la isla de Tenerife se sitúan en la zona de medianías de la vertiente norte, en la cota superior a los Vertisoles. En el sureste se encuentran también en altitudes medias, asociados a materiales antiguos y a condiciones climáticas actuales de humedad moderada (figura 12.3). No se han localizado en el sur y suroeste de la isla. Dada la antigüedad de estos suelos es frecuente que hayan sufrido un rejuvenecimiento superficial con materiales piroclásticos más recientes, cuya evolución ha llevado a

la formación de Inceptisoles. Por tanto, es frecuente encontrar perfiles complejos formados por una superposición de suelos, en los que uno más reciente entierra al Alfisol original. Tanto su comportamiento ante la infiltración como su clasificación dependerán del espesor que tenga el suelo superficial y de la profundidad a la que se encuentre el horizonte argílico.

3.5. Ultisoles

Corresponden a los suelos más evolucionados de las zonas de condensación del alisio, formados a partir de materiales antiguos y en condiciones de alta humedad. Su presencia está limitada al Macizo de Anaga y a algún núcleo de La Esperanza. La intensa erosión a la que han estado sometidos y el rejuvenecimiento superficial que han sufrido con materiales recientes, supone que en el mejor de los casos estén enterrados por suelos de otras tipologías (Andisoles o Inceptisoles), por lo que no es significativa su presencia en la isla.

3.6. Inceptisoles

El orden Inceptisol es muy heterogéneo e incluye suelos muy variados. Desde aquellos con un mínimo desarrollo del perfil, hasta los que presentan un mayor desarrollo, pero insuficiente aún para cumplir los requisitos de los suelos de otros órdenes y ser incorporados a ellos. Por lo tanto, sus características morfológicas, físicas, químicas y mineralógicas varían ampliamente de un suelo a otro dependiendo de la tipología a la que estén cercanos (ándicos, vérticos, etc.) o de si se trata de un Inceptisol tipo.

En la isla de Tenerife, los Inceptisoles se encuentran muy repartidos en diferentes niveles altitudinales, a excepción de la franja costera ocupada por los Aridisoles (figuras 9.3 y 9.4).

3.7. Entisoles

El orden Entisol incluye suelos con escaso o ningún desarrollo de horizontes edáficos, pero que permiten su colonización por ciertas especies vegetales. Las razones de la ausencia de desarrollo pueden ser diversas, según se trate de suelos en dinámica regresiva o evolutiva. Entre ellas destacan la edad reciente del material de origen,

el aporte periódico de materiales aluviales, modificaciones importantes realizadas por el hombre que mezclan y traslocan los horizontes, o topografías muy abruptas. La consecuencia palpable de esta variedad en las condiciones de formación es la diversidad de las características y propiedades de este tipo de suelos.

En la isla de Tenerife existen Entisoles cuyo origen coincide con todas las causas citadas anteriormente, por lo que su ubicación es variada. Se encuentran bajo todas las condiciones de humedad, sobre materiales de diferente origen y edad y en diferentes posiciones fisiográficas (laderas, barrancos, playas, materiales recientes, etc.).

4. Distribución de los órdenes de suelos en la isla

Los suelos presentes en la isla se distribuyen por vertientes (norte y sur) en secuencias altitudinales climáticas y cronológicas.

En la vertiente septentrional se han definido dos secuencias edáficas altitudinales en función de la edad del material de origen (figura 12.3). Sobre materiales antiguos se ha descrito la siguiente: Vertisoles por debajo de los 350 m.s.n.m., Alfisoles entre los 350 y los 900 m.s.n.m., Ultisoles entre los 900 y los 1600 m.s.n.m., e Inceptisoles por encima de 1600 m.s.n.m... Sobre materiales recientes: Inceptisoles en cotas inferiores a los 900 m.s.n.m., Andisoles alofánicos y organominerales entre 900 y 1600 m.s.n.m. y Andisoles vítricos en cotas superiores a los 1600 m.s.n.m., si bien estos últimos se observan también en otros niveles altitudinales sobre piroclastos recientes.

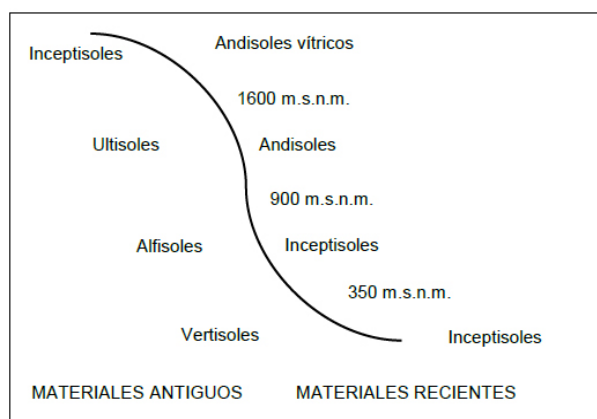


Figura 9.3; Secuencias altitudinales de suelos de la vertiente septentrional

En la vertiente meridional se ha descrito la siguiente secuencia altitudinal (figura 9.4): Aridisoles con cierto carácter salino/sódico por debajo de los 200 m.s.n.m., Aridisoles no salinos ni sódicos entre 200 y 600 m.s.n.m., Vertisoles entre 600 y 1200 m.s.n.m. e Inceptisoles por encima de los 1200 m.s.n.m., adquiriendo carácter ándico a partir de 2200 m.s.n.m.

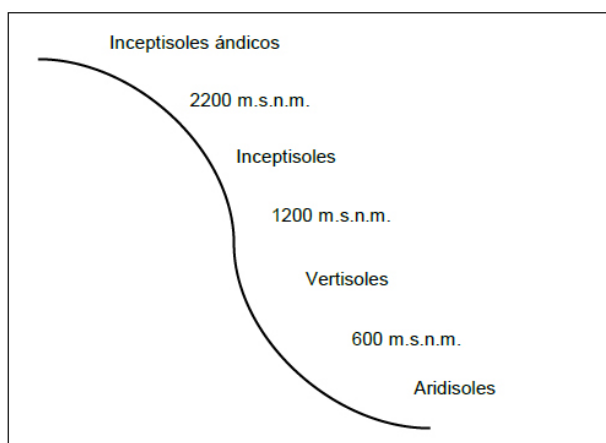


Figura 9.4; Secuencia altitudinal de suelos de la vertiente meridional

En la figura 9.5 se presenta la distribución en la isla de los diferentes órdenes.

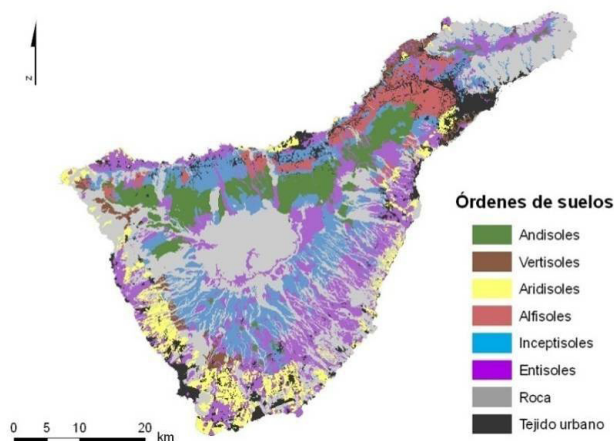


Figura 9.5; Distribución de los órdenes de suelos en Tenerife.

5. Métodos para el estudio de la infiltración

Se han desarrollado numerosos sistemas para el estudio de la velocidad de infiltración del agua en el suelo. De forma general se pueden clasificar en función del tipo de medida que realizan y de las condiciones de pendiente del medio en las que se desarrollan. Por un lado, se encuentran los que permiten medir directamente la velocidad de entrada del agua en el suelo en zonas llanas. Por otro, los que se centran en el estudio de la escorrentía y dan información indirecta de la velocidad de infiltración en zonas de cierta pendiente.

5.1. Métodos de estudio en zonas llanas

Entre los más comunes destacan el permeámetro de disco (Perroux KM, White I, 1988), el permeámetro de Guelph (Reynolds WD, Elrick DE, 1985) y el infiltrómetro de doble anillo (Mathieu C, Pieltain F, 1998). En todos los casos se trata de métodos basados en la medida del tiempo que tarda un volumen determinado de agua en infiltrar en una superficie acotada de suelo.

Los dos primeros métodos tienen como principal ventaja la poca cantidad de agua y tiempo que necesitan para realizar las medidas. Sin embargo, sólo son aplicables a superficies con escasa pedregosidad y presentan un intervalo de trabajo limitado en cuanto a la velocidad de infiltración ($6 - 6 \cdot 10^{-4} \text{ mmh}^{-1}$), por lo que su uso en suelos con valores elevados no resulta adecuado. Además, sobre todo en el caso del permeámetro de Guelph, su diseño permite el flujo de agua horizontal y vertical simultáneamente, por lo que su medida de la infiltración requiere correcciones y presenta diversas dificultades analíticas (Reynolds WD, Elrick DE, 1985).

Según Hills RC (1970), uno de los métodos más extendidos para la medida de la velocidad de infiltración en llanuras agrícolas es el infiltrómetro de doble anillo (Mathieu C, Pieltain F, 1998). Utiliza dos anillos metálicos de diferente diámetro clavados en el suelo de forma concéntrica, de manera que el anillo interior se utiliza para realizar las mediciones y el exterior para limitar el flujo lateral (figura 9.6). Una de las principales ventajas que ofrece este método es su simplicidad y flexibilidad, permitiendo su utilización en casi todo tipo de terrenos llanos. Por el contrario, se trata de un método que consume mucha agua en suelos con elevada infiltración y mucho tiempo en suelos con baja infiltración (Porta J *et al.*, 2003). Además, presenta limitaciones relacionadas principalmente con la modificación del suelo que se pu-

ede ocasionar en su colocación, existencia de flujo de agua en el contacto entre el cilindro y el suelo, y efecto de la carga de agua en la velocidad de infiltración (Hills RC, 1970). Además, este método estudia el proceso de infiltración bajo condiciones de saturación, situación que aunque puede ser común en terrenos de cultivo, no suele darse en zonas forestales (Amerman CR, 1983). Por su flexibilidad es el método que se ha seleccionado para el estudio de la infiltración de los suelos de la isla de Tenerife.



Figura 9.6; Permeámetro de disco



Figura 9.7; Doble anillo

Para la interpretación de los datos de infiltración se suele acudir a la clasificación de Landon JR (1984). En el caso de la infiltración en los suelos de Tenerife se añadió una nueva clase para diferenciar aquellos que presentan valores superiores a 500 mmh^{-1} (tabla 9.1) denominada extremadamente rápida.

Tabla 9.1; Clasificación de Landon (1984) modificada

CLASE	INFILTRACIÓN (mmh ⁻¹)	DENOMINACIÓN
1	< 1	Muy lenta
2	1 - 5	Lenta
3	5 - 20	Moderadamente lenta
4	20 - 60	Moderada
5	60 - 125	Moderadamente rápida
6	125 - 250	Rápida
7	250 - 500	Muy rápida
8	>500	Extremadamente rápida

5.2. Métodos de estudio en zonas de pendiente

En este grupo de métodos cabe destacar el uso de parcelas de erosión y simuladores de lluvia. Las parcelas de erosión son uno de los sistemas más ampliamente extendidos para el estudio hidromorfológico de los suelos. Entre sus principales ventajas destaca la reproducción de las condiciones naturales tanto del suelo como de la lluvia. Por el contrario, esta característica se torna en desventaja si se tiene en cuenta la elevada variabilidad de los factores naturales y la dificultad para su caracterización, especialmente los relacionados con la precipitación (Nichols ML, Sexton HD, 1932; Amerman CR *et al.*, 1970). Este hecho supone la necesidad de realizar medidas durante un número elevado de años para obtener datos fiables. Además, la complejidad de esta infraestructura y los elevados costes de mantenimiento dificultan su utilización.

Los simuladores de lluvia utilizan, como su nombre indica, un dispositivo que simula la formación de gotas de lluvia mediante goteros gravitacionales o pulverizadores a presión. Estas gotas caen sobre una parcela delimitada en el suelo desde una altura determinada y con una intensidad de lluvia seleccionada en función de los objetivos del estudio (figura 9.7). La medida de la infiltración se realiza en este caso de forma indirecta, por la diferencia entre la intensidad de lluvia aplicada y el flujo de escorrentía recogido en un dispositivo situado al final de la parcela. Los simuladores de lluvia son en la actualidad los dispositivos más utilizados y eficaces para el estudio del proceso de infiltración y escorrentía en zonas naturales (Cerdà A, 1998; Pierson FB *et al.*, 2001).



Figura 9.8; Simulador de lluvia

El uso de simuladores de lluvia para el estudio de la infiltración del agua en el suelo se remonta a 1932 con Nichols ML y Sexton HD, pioneros en su diseño y descripción. Posteriormente otros autores generalizaron su utilización (Youngs EG, 1964; Amerman CR *et al.*, 1970; Rawitz E *et al.*, 1972). En España se han descrito en los últimos tiempos algunos de estos dispositivos, como es el caso de los mostrados por Sanroque P *et al.* (1984), Benito E *et al.* (1986), Calvo Casés A *et al.* (1988), Navas A *et al.* (1990), Nacci S y Pla I (1991) o Cerdà A *et al.* (1997). La gran ventaja de este sistema es que permite estudiar la velocidad de infiltración del agua en el suelo en condiciones muy similares a las naturales: con lluvia simulada, escasa perturbación del suelo y en todo tipo de pendientes. Además, la utilización de dispositivos que permiten controlar la intensidad de la lluvia durante todo el proceso posibilita la determinación de la tasa de infiltración, escorrentía y erosión en los suelos con mucha mayor precisión que en el caso de las lluvias naturales, que se caracterizan por su variabilidad. Su menor gasto de agua, tiempo y su flexibilidad permiten su uso en condiciones que serían limitantes para el resto de métodos. Por el contrario, sus desventajas están relacionadas con la falta de precisión para replicar los eventos de lluvia natural (Bryan RB, Luk SH, 1981; Lal R, 1988; Benito E *et al.*, 2001). En el caso de los simuladores que utilizan goteros a presión atmosférica, las gotas de lluvia no alcanzan la velocidad terminal excepto cuando la altura de caída es superior a 12 m (Hudson NW, 1971). Por este motivo poseen una energía cinética inferior a la de

lluvias naturales dado que dicha altura no es operativa en condiciones de campo (Benito E *et al.*, 2001). Igualmente, la escasa superficie de muestreo y la alta variabilidad de las propiedades hidrológicas del suelo como la infiltración suponen la necesidad de realizar un número elevado de réplicas. El estudio de la influencia de la pendiente en la infiltración y escorrentía de los Andisoles de la isla de Tenerife ha sido desarrollado utilizando esta metodología.

6. La infiltración de los suelos. Estudio en zonas llanas

Durante los últimos años se ha desarrollado en Tenerife un estudio sobre la caracterización hidrológica de sus suelos, incluyendo medidas de infiltración mediante el método del doble anillo. Los resultados obtenidos hasta el momento muestran la gran dependencia de este proceso hacia las propiedades edáficas y la tipología del suelo. También se ha comprobado que los principales factores que afectan al proceso de infiltración en Tenerife son el desarrollo e integridad estructural, la granulometría y el contenido y la naturaleza de las arcillas.

En algunos suelos de la isla, el desarrollo y estabilidad estructural son las propiedades con mayor influencia en la conformación y mantenimiento de su espacio poroso y por lo tanto, en el proceso de infiltración. Los ANDISOLES NO VÍTRICOS (alofánicos y organominerales) son ejemplo de esta relación. Estos Andisoles son los suelos que presentan los mayores valores de infiltración, que en algunos casos superaron los 700 mmh⁻¹, a la vez que muestran la mayor estructuración y estabilidad de los agregados en condiciones naturales. El elevado desarrollo e integridad estructural para estos suelos está relacionado fundamentalmente con su elevado contenido de materia orgánica y productos de ordenación de corto alcance (Nanzzyo M *et al.*, 1993). En concordancia con los resultados obtenidos por Yimer F *et al.* (2008) para Andisoles de Etiopía, se trata de suelos que presentan elevados valores de infiltración, comparables incluso a los presentados por suelos ricos en piroclastos o de origen coluvial y de granulometría gruesa o muy gruesa.

En los Andisoles se observa una marcada dependencia de la agregación y estabilidad estructural con el uso y manejo del suelo (figura 12.8). Es ampliamente conocido el efecto negativo del cambio de uso en estas propiedades para este tipo de suelos, especialmente en aquellos sometidos a una actividad agrícola o de pastoreo intensiva (Poulenard J *et al.*, 2001). El cambio de uso supone la modificación del balance aporte-humificación-mineralización de la materia orgánica en el suelo y la disminución de su contenido. Asimismo, las técnicas agrícolas implican en la may-

oría de los casos una alteración mecánica de la agregación del suelo (Molina A *et al.*, 2007). Como consecuencia se aprecian efectos negativos sobre la estructura del suelo y su porosidad (Nanzzyo M *et al.*, 1993). La disminución de la tasa de infiltración de estos suelos con el cambio de uso es equivalente a la sufrida por los índices de estabilidad, lo que indica la relación entre ambas propiedades. Los suelos agrícolas estudiados dentro de esta tipología promedian una infiltración que no supera los 70 mmh⁻¹. Por otro lado, las variaciones observadas en los parámetros estructurales con el cambio de vegetación de monteverde a pinar, son de mayor magnitud incluso que las que se aprecian en el paso de pinar a uso agrícola. Estos resultados indican la relevancia de la vegetación en el comportamiento hidrológico de los suelos y de las propiedades asociadas. La infiltración de los Andisoles con monteverde se acerca en promedio a los 800 mmh⁻¹, mientras que cuando su vegetación es pinar, esta propiedad sufre un marcado descenso y no supera los 180 mmh⁻¹.

Los Aridisoles presentan un comportamiento totalmente opuesto al de los suelos anteriormente comentados en cuanto al desarrollo estructural y la infiltración. A pesar de su amplia casuística, se caracterizan por ser suelos con una gran inestabilidad estructural. Los resultados obtenidos corroboran este extremo, dado que muestran los menores valores de este parámetro entre todos los órdenes estudiados. Los Aridisoles se sitúan en la clase de infiltración más baja de las identificadas en la isla, con valores que en algunos casos no superan los 15 mmh⁻¹. Como en el caso de los Vertisoles, la dominancia de arcillas hinchables dentro de la fracción fina unida a su escaso contenido de materia orgánica implican un bajo desarrollo e integridad estructural. En algunos casos incluso, su cercanía al mar contribuye al enriquecimiento de sodio en el complejo de cambio y por lo tanto, a una debilidad estructural por la dispersión de sus constituyentes. Estas condiciones dan lugar a la formación de procesos de sellado y encostramiento superficial de los suelos y, como consecuencia de la oclusión de sus poros, a la disminución de su conductividad hidráulica e infiltración (Porta J *et al.*, 2003).

Existe otro conjunto de suelos en los que la distribución granulométrica o la consistencia del material, marcan la conformación del espacio poroso y por lo tanto la infiltración. Es el caso de los Andisoles vítricos y de los Entisoles. Estos suelos se caracterizan por su escaso desarrollo y en ellos destaca un elevado porcentaje de elementos gruesos, una granulometría dominada por la fracción arena y un contenido de materia orgánica relativamente bajo. Por ello presentan una estructura poco desarrollada y una baja estabilidad estructural. Sin embargo, su textura gruesa supone la prevalencia de macroporos (>100 µm) sobre meso y microporos (6-4 µm y <4 µm respectivamente) y por ello, una gran cantidad de canales de flujo (Nanzzyo M *et al.*, 1993). La distribución granulométrica de estos suelos controla la variabili-

dad de los valores de infiltración obtenidos. Los suelos con texturas más gruesas (la suma de los elementos gruesos y las arenas se acerca al 90%) muestran valores de infiltración elevados que promedian los 400 mmh^{-1} y que en algunos casos alcanzan los 600 mmh^{-1} . En los suelos de granulometría media (la suma de los elementos gruesos y las arenas se acerca al 80%) los valores decaen hasta valores cercanos a 120 mmh^{-1} , mientras que cuando son más finos (la suma de los elementos gruesos y las arenas es próxima al 50%), sus valores apenas alcanzan los 60 mmh^{-1} .

Un caso particular corresponde a los Entisoles desarrollados sobre materiales pumíticos (tobas). El grado de transformación de este material como consecuencia de su uso agrícola, supone diferencias en sus propiedades y en la infiltración. Los valores de entrada de agua en el suelo varían entre los 25 mmh^{-1} para las tobas consolidadas en estado natural y los 200 mmh^{-1} para aquellas que han sido sometidas a transformaciones profundas con fines agrícolas y cuya densidad aparente ha disminuido como consecuencia de ellas.

Un grupo de suelos intermedio en cuanto a la estabilidad estructural, y en los que el contenido y la naturaleza de las arcillas toma especial importancia, es el compuesto por los Vertisoles y los Alfisoles. En general es aceptado que el contenido de arcilla tiene una relación inversa con la tasa de infiltración de los suelos, y que esta relación se ve acentuada cuando se trata de arcillas con características expansibles (Foley JL et al., 2006). Los VERTISOLES, como ya se ha comentado, se caracterizan por el elevado contenido en arcillas hinchables y la existencia de ciclos de expansión-retracción relacionados con su contenido de humedad. Este comportamiento en función del estado de saturación supone enormes diferencias temporales en el proceso de infiltración. El rápido flujo del agua que se da en las primeras fases del proceso aprovechando las grietas de retracción cuando el suelo no está saturado, decae progresivamente a medida que el suelo se satura y se produce la expansión de sus silicatos. En última instancia, la abundancia de este tipo de arcillas supone la conformación de un espacio poroso dominado por los microporos, que dificultan el flujo de agua a través del suelo y reducen la infiltración. En este mismo sentido, los valores relativamente bajos de estabilidad estructural obtenidos en relación a la agregación, indican que la dominancia de esta fracción fina supone también la prevalencia de procesos de destrucción de la estructura por humedecimiento rápido, lo que puede facilitar la formación de sellado y encostramiento de su superficie y la disminución de la infiltración (Lado M et al., 2004). Por otro lado, la escasa influencia del resto de los parámetros edáficos en la infiltración indica que la influencia de la mineralogía es de tal envergadura que domina por completo el proceso de entrada de agua en el suelo (Kironchi G et al., 1992). Sus valores de infiltración están entre los menores

obtenidos para los suelos de Tenerife, promediando 30 mmh⁻¹, si bien en algunos casos no alcanzan los 10 mmh⁻¹.

En una situación similar se encuentran los Inceptisoles con características vérticas, en los que parte de sus propiedades coinciden con las de los Vertisoles. Se identifican por la dominancia de arcillas expansibles, su textura arcillosa y una elevada agregación y moderada estabilidad estructural. Presentan los valores de infiltración más bajos de todo su orden (70 mmh⁻¹) y se asemejan en este aspecto a los suelos del orden Vertisol.

Los Alfisoles se diferencian de los Vertisoles, entre otras cosas, en la mineralogía de sus arcillas, que hace que los procesos que determinan la infiltración difieran ligeramente. En el caso de los Alfisoles son principalmente los fenómenos de iluviación de arcilla, los que determinan su comportamiento hidrológico, dado que suponen la colmatación total o parcial de sus poros. Como en el caso de los Vertisoles, la abundancia de arcillas en el suelo supone no sólo una distribución del espacio poroso dominada por los microporos, sino también una disminución de la estabilidad estructural ante la humectación. Por otro lado, los frecuentes rejuvenecimientos superficiales por aporte de piroclastos que han sufrido estos suelos hacen variar sus propiedades y su comportamiento ante la infiltración. Los Alfisoles que no han sufrido rejuvenecimientos presentan valores de infiltración considerablemente menores (60 mmh⁻¹) que los rejuvenecidos (160 mmh⁻¹), aunque sin llegar a los niveles marcados por los Vertisoles.

Por último, los Inceptisoles modales, Inceptisoles con propiedades ándicas y los Alfisoles rejuvenecidos normalmente por los anteriores, presentan un conjunto de características edáficas que podrían calificarse como equilibradas desde el punto de vista de la infiltración por la ausencia de un factor dominante del proceso. Comparten una textura franca, la ausencia de arcillas hinchables en su fracción fina, una densidad aparente media y una moderada agregación y estabilidad estructural, lo que contribuye a que tengan una infiltración que ronda entre 140 y 180 mmh⁻¹.

Tabla 9.2; Valor y clase de infiltración de los suelos de Tenerife.

CLASE	FACTOR MODIFICADOR	INFILTRACIÓN (mmh ⁻¹)	CLASE DE INFILTRACIÓN
Andisoles no vítricos (alofánicos y organominerales)	Monteverde	800	Extremadamente rápida
	Pinar	180	Rápida
	Agrícola	70	Moderadamente rápida
Andisoles vítricos	-	430	Muy rápida

Vertisoles	-	30	Moderada
Aridisoles	-	50	Moderada
Alfisoles	No rejuvenecidos	60	Moderada
	Rejuvenecidos	160	Rápida
Inceptisoles	Modales	140	Rápida
	Ándicos	180	Rápida
	Vérticos	80	Moderadamente rápida
Entisoles	Textura gruesa	400	Muy rápida
	Textura media	120	Moderadamente rápida
	Textura fina	60	Moderada

7. Distribución de la velocidad de infiltración de los suelos de Tenerife

Aunque los suelos de Tenerife tienen en general velocidades de infiltración que podrían calificarse de moderadas, algunas zonas muestran una cierta restricción a la entrada de agua. En la tabla 12.3 se presenta la superficie ocupada por las diferentes clases de infiltración y en la figura 9.11 su distribución cartográfica.

Tabla 9.3; Superficie ocupada por las diferentes clases de infiltración

CLASE LONDON (1984)	INFILTRACIÓN (mmh ⁻¹)	DENOMINACIÓN	SUPERFICIE (km ²)	SUPERFICIE (%)
1	< 1	Muy lenta	139,5	6,9
2	1 - 5	Lenta	12,5	0,6
3	5 - 20	Moderadamente lenta	88,5	4,4
4	20 - 60	Moderada	582,1	28,6
5	60 - 125	Moderadamente rápida	274,3	13,5
6	125 - 250	Rápida	820,5	40,4
7	250 - 500	Muy rápida	88,0	4,3
8	>500	Extremadamente rápida	27,5	1,4

El área con infiltración calificada como *extremadamente rápida* supera el 1% de la superficie de la isla. Está acotada principalmente al Macizo de Anaga, así como en algunos núcleos aislados del norte de la isla y del Macizo de Teno, coincidiendo con

Andisoles alofánicos y organominerales con vegetación de monteverde. La clase *muy rápida* se localiza en algunos núcleos del norte y oeste de la isla, relacionada fundamentalmente con la presencia de Andisoles con carácter vítrico. Ocupa alrededor de un 4% de la superficie de la isla.

La clase *rápida* es la que ocupa una mayor superficie de la isla (40% del total). Coincide en el norte con la corona forestal, donde se encuentran Andisoles no vítricos (alofánicos) con vegetación de pinar, así como en aquellas zonas en las que los Inceptisoles son la tipología de suelos dominante y que van desde las cumbres hasta la costa. En la vertiente sur esta clase se ubica en las zonas altas y se relaciona tanto con Inceptisoles como con Entisoles y coladas recientes. También se localiza en el Circo de las Cañadas y en el edificio Teide-Pico Viejo, coincidiendo como en el caso anterior con materiales piroclásticos jóvenes y coladas recientes.

La clase de infiltración *moderadamente rápida* ocupa un 14% de la isla y se sitúa tanto en las medianías del norte como en las del sur de la isla, aunque relacionada con diferentes tipos de suelo. En la vertiente septentrional, la presencia de Andisoles con uso agrícola y Alfisoles es la determinante de los valores de infiltración. Mientras, en el caso de la meridional son los materiales pumíticos representados tanto por los *jables* como por las tobas preparadas para el cultivo los que definen esta clase. Las *sorribas* llevan aparejadas la existencia de esta clase en ambas vertientes.

En la vertiente norte, la presencia de Aridisoles en la franja costera y Vertisoles en un nivel superior está relacionada con la clase *moderada*. En la vertiente sur, los Aridisoles, que alcanzan una mayor altitud, y los Vertisoles localizados inmediatamente sobre estos son también los responsables de esta clase de infiltración. De la misma manera, se localiza en áreas con elevada pendiente relacionada con unidades cartográficas en las que aparecen rocas y Entisoles. En total esta clase ocupa un 29% de la superficie insular.

La clase *moderadamente lenta* ocupa una pequeña superficie (4%), y se sitúa en localidades de la vertiente sur y sureste en las que se combinan las rocas con los Entisoles en régimen de humedad árido. La clase *lenta*, cuya presencia es testimonial (< 1%), se relaciona con la ausencia de suelo y la prevalencia de roca como unidad cartográfica. Por último, la clase *muy lenta* (7%) coincide con las zonas urbanas.

De los resultados de la cartografía se desprende que, si bien los suelos de la mayoría de la isla presentan velocidades de infiltración moderadas-elevadas, en algunas zonas los suelos muestran ciertas limitaciones a este proceso. Descontando las zonas urbanas que presentan una limitación casi total a la infiltración, las mayores limita-

ciones se dan en las zonas costeras del sur de la isla, coincidiendo con los suelos del orden Aridisol y Vertisol. Por el contrario, las unidades situadas en la corona forestal principalmente en su vertiente norte, y en menor medida en la sur, presentan los mayores valores de infiltración, destacando dentro de ellas las zonas ocupadas por vegetación de monteverde.

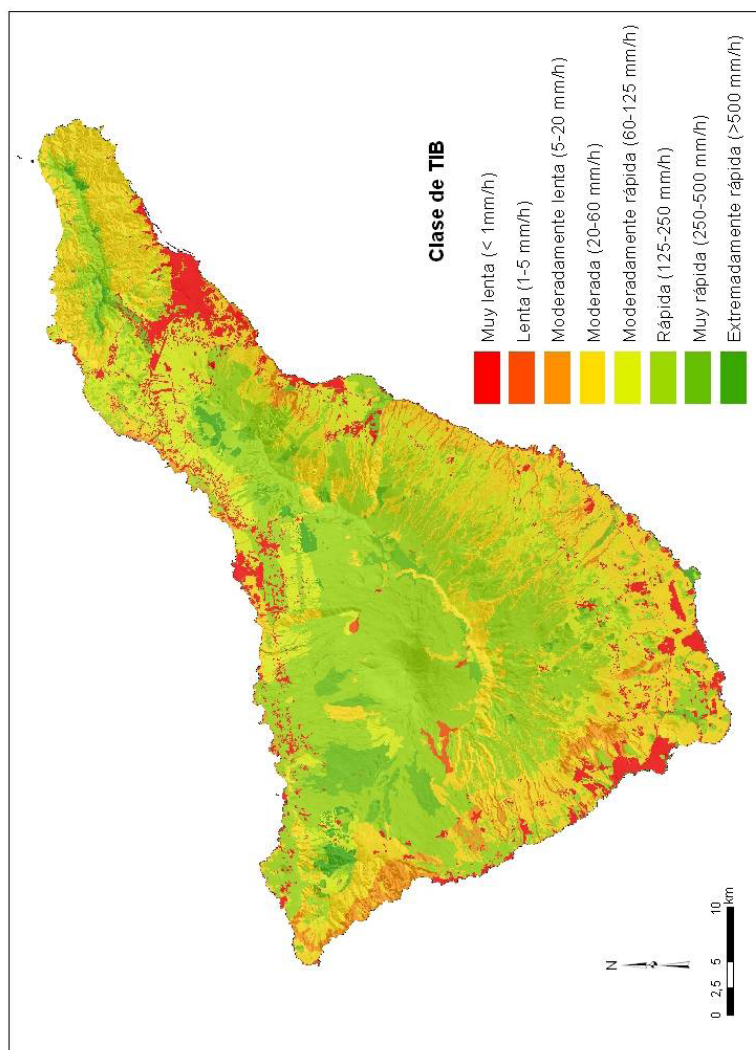


Figura 9.11; Velocidad de infiltración de los suelos de Tenerife

8. Efecto de la pendiente en la infiltración del agua en el suelo

El efecto de la pendiente sobre la infiltración del agua en los suelos de Tenerife ha sido estudiado utilizando simuladores de lluvia, aunque por el momento sólo en los Andisoles no vítricos (alofánicos y organominerales) con vegetación forestal. Estos estudios han desvelado no sólo la influencia de la pendiente del terreno en la infiltración, sino también la de otros factores como las características de los horizontes orgánicos superficiales del suelo (mantillo) o de la vegetación de la zona.

En general la pendiente del terreno tiene una enorme influencia en la infiltración de estos suelos. Según los resultados obtenidos, la infiltración decrece considerablemente en los suelos al aumentar la pendiente, pudiendo llegar a ser hasta diez veces menor en pendientes del 50 % frente a los suelos con una inclinación del 10%. Por otro lado, como se aprecia en la figura 9.12, la magnitud del descenso de la infiltración no es progresiva y lineal con el incremento de la pendiente, sino que muestra umbrales antes de los que la infiltración prácticamente no varía y tras los que los cambios son sustanciales.

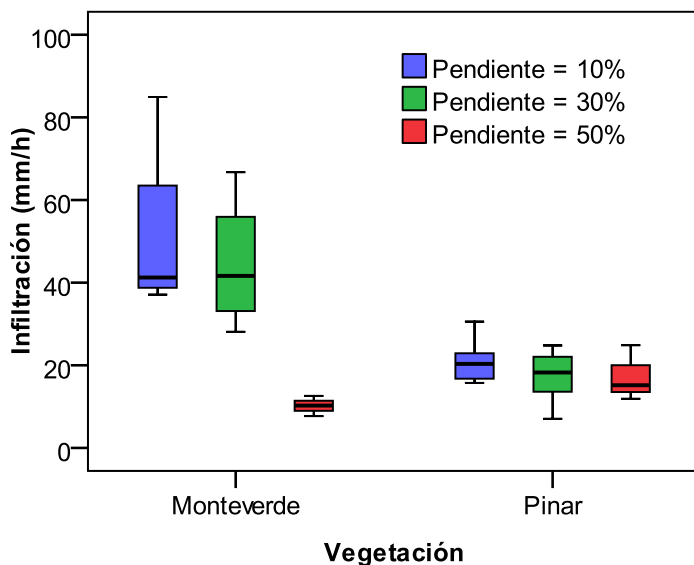


Figura 9.12; Infiltración de Andisoles en función de la pendiente y vegetación

Los estudios al respecto indican que este comportamiento está relacionado con la vegetación de la zona y fundamentalmente con las propiedades del mantillo. Esta estructura orgánica juega un papel fundamental en los procesos hidrológicos al constituir la interfase que separa el suelo mineral y la atmósfera en muchos ecosistemas terrestres (Keith DM *et al.*, 2010). El mantillo está formado principalmente por material vegetal en proceso de descomposición. Por su ubicación y propiedades físicas, en muchos casos diferentes a las del suelo subyacente, puede alterar la cantidad de agua de lluvia disponible para la infiltración y escorrentía (Guevara-Escobar A *et al.*, 2007), y modificar la respuesta hidrológica de los suelos (Keith DM *et al.*, 2010). Por su composición, sus propiedades están íntimamente relacionadas con la vegetación de la zona, por lo que su respuesta ante la infiltración dependerá de este factor. A pesar de todo lo anterior, son pocos los estudios hidrológicos en zonas forestales que tengan en cuenta el mantillo, estando la mayoría de ellos centrados en el suelo mineral (Buttle JM *et al.*, 2000; Buttle JM *et al.*, 2005).

Los estudios realizados muestran una gran divergencia en cuanto a las propiedades del mantillo para las dos vegetaciones forestales presentes en los Andisoles de Tenerife (monteverde y pinar). Esta diferencia está relacionada principalmente con la consistencia de las partículas que lo componen y su repelencia al agua (figura 9.13). Las partículas del mantillo se encuentran sueltas en el caso del monteverde y cementadas en el del pinar. Con respecto a la repelencia al agua, esta propiedad es muy superior en el caso de las zonas con pinar. En definitiva, en los suelos con monteverde el mantillo no constituye un horizonte limitante al paso del agua dada su gran porosidad y baja hidrofobicidad. Por el contrario, las características en pinar, con una menor porosidad y una mayor repelencia al agua del horizonte, hacen que el mantillo pueda suponer un impedimento al paso del agua y, por lo tanto, controlar el proceso de infiltración del agua de lluvia.



Figura 9.13; Características del mantillo para pinar (arriba) y monteverde (abajo)

Como consecuencia, en los Andisoles con monteverde el proceso de infiltración viene determinado principalmente por el elevado desarrollo estructural que presentan los suelos, tal y como sucedía en el caso de las zonas llanas. En este caso, la infiltración ronda los 50 mmh^{-1} para pendientes suaves (10%) y 45 mmh^{-1} para moderadas (30%), lo que indica el escaso efecto que tiene la inclinación del terreno en estas condiciones. Únicamente en pendientes elevadas (50%), los valores de este parámetro decrecen sensiblemente hasta alcanzar los 10 mmh^{-1} , indicando la prevalencia de la inclinación del terreno sobre la elevada porosidad del suelo en estas condiciones. Este comportamiento muestra la presencia de un umbral de pendiente entre 30% y 50% de inclinación a partir del cual la infiltración pasa de estar dominada por la elevada porosidad del suelo a estar controlada por la pendiente y la gravedad.

Por otro lado, a pesar de que los suelos con pinar tienen un alto desarrollo estructural y porosidad, el efecto limitante a la entrada de agua que muestra el mantillo hace que la influencia de las propiedades del suelo sobre la infiltración se vea limitada. En esta vegetación, se aprecian valores bajos de infiltración para todas las pendientes estudiadas. Sus valores no superan en ningún caso los 20 mmh^{-1} y la diferencia entre las pendientes suaves (10%) y elevadas (50%) no supera los 5 mmh^{-1} . Estos resultados indican la escasa importancia de la porosidad del suelo y la dominancia de la gravedad en el proceso, potenciada por la elevada repelencia al agua del mantillo. Al contrario de lo que ocurría en el caso de los Andisoles con monteverde, en esta vegetación la gravedad domina la infiltración ya para pendientes suaves (10%), por lo que se puede estimar que el umbral a partir del que este factor controla el proceso se sitúa por debajo de esta inclinación.

Estos resultados modifican sustancialmente el escenario hidrológico mostrado por los Andisoles en zonas llanas, en el que no se apreciaban limitaciones de consideración en el proceso de infiltración del agua de lluvia en el suelo. La singularidad de los resultados de este estudio, tanto por el descenso de los valores de infiltración en zonas de pendiente como por la ausencia de una relación lineal entre la infiltración y la pendiente, es indicativa de la dificultad que entraña la estimación de esta propiedad a partir de los datos de zonas llanas. En el mismo sentido, los datos obtenidos indican la existencia de propiedades edáficas y ambientales, como la composición del mantillo en el caso de los Andisoles, que si bien no muestran una importancia capital cuando el terreno no está inclinado, son capaces de afectar profundamente el fenómeno de infiltración cuando éste se desarrolla en condiciones de pendiente. En cuanto a los procesos erosivos, aunque se aprecia una relación directa entre la pendiente del terreno y la pérdida de suelo vinculada con la disminución de la infiltración, los valores absolutos de erosión en estos suelos son considerablemente

menores a los que se presentan otras tipologías edáficas. Las singularidades mineralógicas de estos suelos, que se traducen en una elevada estabilidad estructural, además del efecto protector del mantillo que los cubre, parecen ser los responsables de su baja susceptibilidad a la erosión.

Bibliografía consultada y referencias

- AGASSI, M., SHAINBERG, I., MORIN, J., (1981); Effect of electrolyte concentration and soil sodicity on infiltration rate and crust formation: *Soil Science Society of America Journal*, vol. 45, 848-851.
- AKRAM, M., KEMPER, W.D., (1979); Infiltration of soils as affected by the pressure and water-content at the time of compaction: *Soil Science Society of America Journal*, vol. 43, 1080-1086.
- AMERMAN, C.R., (1983); Infiltration measurements, *in* Engineers, ASoA, ed., National Conference on Advanced Infiltration: St. Joseph, EEUU.
- AMERMAN, C.R., HILLEL, D.I., PETERSON, A.E., (1970); A variable-intensity sprinkling infiltrometer: *Soil Science Society of America Proceedings*, vol. 34, 830-832.
- BATEMAN, H.P., (1963); Effect of field machine compaction on soil physical properties and crop response: *Transactions of the ASAE*, vol. 6, 19-25.
- BEN-HUR, M., AGASSI, M., KEREN, R., ZHANG, J., (1998); Compaction, aging, and raindrop-impact effects on hydraulic properties of saline and sodic Vertisols: *Soil Science Society of America Journal*, vol. 62, 1377-1383.
- BENITO, E., DE BLAS, E., SANTIAGO, J.L., VARELA, M.E., (2001); Descripción y puesta a punto de un simulador de lluvia de campo para estudios de escorrentía superficial y erosión del suelo: *Cadernos Laboratório Xeolóxico de Laxe*, vol. 26, 211-219.
- BENITO, E., GÓMEZ-ULLA, A., DÍAZ-FIERROS, F., (1986); Descripción de un simulador de lluvia para estudios de erodibilidad del suelo y estabilidad de los agregados al agua: *Anales de Edafología y Agrobiología*, vol. XLV, 1115-1126.
- BRYAN, R.B., LUK, S.H., (1981); Laboratory experiments on the variation of soil-erosion under simulated rainfall: *Geoderma*, vol. 26, 245-265.
- BUTTLE, J.M., CREED, I.F., MOORE, R.D., (2005); Advances in Canadian forest hydrology, 1999-2003: *Hydrological Processes*, vol. 19, 169-200.
- BUTTLE, J.M., CREED, I.F., POMEROY, J.W., (2000); Advances in Canadian forest hydrology, 1995-1998: *Hydrological Processes*, vol. 14, 1551-1578.
- CALVO CASÉS, A., GISBERT, J.M., PALAU, E., ROMERO, E., (1988); Un simulador de lluvia portátil de fácil construcción. *En* Sala, M, Gallard, F, eds., Monografías de la seg. 1, Volumen 1: Zaragoza, Sociedad Española de Geomorfología, pp. 6-15.
- CERDÀ, A., (1998); Changes in overland flow and infiltration after a rangeland fire in a Mediterranean scrubland: *Hydrological Processes*, vol. 12, 1031-1042.
- CERDÀ, A., IBÁÑEZ, S., CALVO, A., (1997); Design and operation of a small and portable rainfall simulator for rugged terrain: *Soil Technology*, vol. 11, 163-170.
- CONSEJO INSULAR DE AGUAS DE Tenerife, (2004); [Http://www.aguastenerife.org/4_tfeyelagua/index.html](http://www.aguastenerife.org/4_tfeyelagua/index.html).
- DOERR, S.H., SHAKESBY, R.A., WALSH, R.P.D., (2000); Soil water repellency: Its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance: *Earth-Science Reviews*, vol. 51, 33-65.
- EMERSON, W.W., (1977); Physical properties and structure. *En* Russell, JS, Greacen, EL, eds., Soil factors in crop production in a semi-arid environment: Queensland, University of Queensland Press, pp. 78-104.

- FERNÁNDEZ CALDAS, E., TEJEDOR SALGUERO, M.L., QUANTIN, P., (1982); Suelos de regiones volcánicas. Tenerife. Islas Canarias: Santa Cruz de Tenerife, Secretariado de Publicaciones de la Universidad de La Laguna, 250 pp.
- FOLEY, J.L., TOLMIE, P.E., SILBURN, D.M., (2006); Improved measurement of conductivity on swelling clay soils using a modified disc permeameter method: *Australian Journal of Soil Research*, vol. 44, 701-710.
- FOX, D.M., BRYAN, R.B., PRICE, A.G., (1997); The influence of slope angle on final infiltration rate for interrill conditions: *Geoderma*, vol. 80, 181-194.
- GUEVARA-ESCOBAR, A., GONZÁLEZ-SOSA, E., RAMOS-SALINAS, M., HERNÁNDEZ-DELGADO, G.D., (2007); Experimental analysis of drainage and water storage of litter layers: *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 11, 1703-1716.
- HELALIA, A.M., (1993); The relation between soil infiltration and effective porosity in different soils: *Agricultural Water Management*, vol. 24, 39-47.
- HILLEL, D., (1980); *Fundamentals of soil physics*: Nueva York, Academic Press, 413 pp.
- HILLS, R.C., (1970); The determination of the infiltration capacity field soils using the cylinder infiltrometer, *British Geomorph. Res. Group*, 25 pp.
- HUDSON, N.W., (1971); *Soil conservation*: Londres, B.T. Batsford Ltd., 391 pp.
- KAY, B.D., ANGERS, D.A., (1999); Soil structure. *En* Summer, ME, ed., *Handbok of soil science*: Nueva York, CRC Press, pp. A229-A269.
- KEITH, D.M., JOHNSON, E.A., VALEO, C., (2010); A hillslope forest floor (duff) water budget and the transition to local control: *Hydrological Processes*, vol. 24, 2738-2751.
- KIRONCHI, G., KINYALI, S.M., MBUVI, J.P., (1992); Effects of soil, vegetation and land use on infiltration in a tropical semi-arid catchment: *E. Afr. Agric. For. J.*, vol. 57, 177-185.
- LADO, M., BEN-HUR, M., SHAINBERG, I., (2004); Soil wetting and texture effects on aggregate stability, seal formation, and erosion: *Soil Science Society of America Journal*, vol. 68, 1992-1999.
- LAL, R., (1988); Soil erosion by wind and water: Problems and prospects. *En* Lal, R, ed., *Soil erosion research methods*, Volumen 16: Ankeny, Soil and Water Conservation Society, pp. 1-8.
- LANDON, J.R., (1984); *Tropical soil manual*. Booker agriculture: Londres, International Limited, 450 pp.
- MATHIEU, C., PIELTAIN, F., (1998); *Analyse physique des sols. Méthodes choisies*: Paris, Lavoisier. Tec. Coc., 275 pp.
- MOLINA, A., GOVERS, G., VANACKER, V., POESEN, J., ZEELMAEKERS, E., CISNEROS, F., (2007); Runoff generation in a degraded Andean ecosystem: Interaction of vegetation cover and land use: *Catena*, vol. 71, 357-370.
- NACCI, S., PLA, I., (1991); Técnicas y equipos desarrollados en el país para evaluar propiedades físicas de los suelos: Maracay, FONAIAP, 48 pp.
- NANZYU, M., SHOJI, S., DAHLGREN, R., (1993); Physical characteristics of volcanic ash soils. *En* Shoji, S, Nanzyo, M, Dahlgren, R, eds., *Volcanic ash soils: Genesis, properties and utilization: Developments in soil science 21*: Amsterdam, Elsevier Science Publishers B.V., pp. 288.
- NAVAS, A., ALBERTO, F., MACHÍN, J., GALÁN, A., (1990); Design and operation of a rainfall simulator for field studies of runoff and soil erosion: *Soil Technology*, vol. 3, 385-397.
- NICHOLS, M.L., SEXTON, H.D., (1932); A method of studying soil erosion: *Agricultural Engineering*, vol. 13, 101-103.
- PERROUX, K.M., WHITE, I., (1988); Designs for disk permeameters: *Soil Science Society of America Journal*, vol. 52, 1205-1215.
- PIERSON, F.B., ROBICHAUD, P.R., SPAETH, K.E., (2001); Spatial and temporal effects of wildfire on the hydrology of a steep rangeland watershed: *Hydrological Processes*, vol. 15, 2905-2916.
- PORTA, J., LÓPEZ-ACEVEDO, M., ROQUERO, C., (2003); *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. 3ª edición.: Madrid, Ediciones Mundi-Prensa, 929 pp.

- POULENARD, J., PODWOJEWSKI, P., HERBILLON, A.J., (2003); Characteristics of non-allophanic Andisols with hydric properties from the ecuadorian paramos: *Geoderma*, vol. 117, 267-281.
- POULENARD, J., PODWOJEWSKI, P., JANEAU, J.L., COLLINET, J., (2001); Runoff and soil erosion under rainfall simulation of Andisols from the Ecuadorian *Páramo*: Effect of tillage and burning: *Catena*, vol. 45, 185-207.
- RAWITZ, E., MARGOLIN, M., HILLEL, D., (1972); Improved variable-intensity sprinkling infiltrometer: *Soil Science Society of America Proceedings*, vol. 36, 533-535.
- REYNOLDS, W.D., ELRICK, D.E., (1985); *In situ* measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the alpha-parameter using the guelph permeameter: *Soil Science*, vol. 140, 292-302.
- RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ, A., ARBELO, C.D., GUERRA, J.A., MORA, J.L., (2002); Erosión hídrica en andosoles de las Islas Canarias: *Edafología*, vol. 9, 23-30.
- SANROQUE, P., RUBIO, J.L., SÁNCHEZ, J., (1984); Simulador de lluvia para el estudio de la erosionabilidad del suelo en laboratorio, I Congreso Español de Geología, Volumen I: Segovia, España, Colegio Oficial de Geólogos, p. 783-794.
- SHAINBERG, I., LETEY, J., (1984); Response of soils to sodic and saline conditions: *Hilgardia*, vol. 52, 1-57.
- SHARMA, K.D., SINGH, H.P., PAREEK, O.P., (1983); Rainwater infiltration into a bare loamy sand: *Hydrol. Sci. J.*, vol. 28, 417-424.
- SOIL SURVEY STAFF, (1999); *Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*: Washington, D.C., N.R.C.S. USDA, 869 pp.
- U.S. GEOLOGICAL SURVEY, (2011), <http://ga.water.usgs.gov/edu/watercycle.html>.
- YIMER, F., MESSING, I., LEDIN, S., ABDELKADIR, A., (2008); Effects of different land use types on infiltration capacity in a catchment in the highlands of Ethiopia: *Soil Use and Management*, vol. 24, 344-349.
- YOUNGS, E.G., (1964); An infiltration method of measuring the hydraulic conductivity of unsaturated porous materials: *Soil Science*, vol. 109, 307-311.

Aprovechamientos hídricos subterráneos en islas volcánicas. Minería del agua

Juan Carlos Santamarta Cerezal

1. Introducción

Las islas Canarias son de origen volcánico, este hecho condiciona su geología y la forma de aprovechar los recursos hídricos, principalmente los subterráneos. Los sistemas de captación, para el aprovechamiento de los recursos subterráneos, vienen representados por las minas-galerías o bien los pozos y sondeos (más modernos). La *minería del agua dulce* desarrollada en el archipiélago es singular y con una historia que en algunos casos supera los 100 años, los sistemas de avance desarrollados han tenido poca evolución a lo largo del tiempo, utilizándose tecnologías de antaño; si bien a la hora de regular los recursos alumbrados, se han ideado unos sistemas de gestión de la oferta, mediante *cierres geológicos*, que pueden ser interesantes a la hora de aprovechar la captación.

Debido a los materiales volcánicos que se atraviesan, es necesario el uso de explosivos, que en algunos momentos de la perforación, deben poder ser operativos con agua. Los rendimientos de avance en la perforación no han mejorado sustancialmente, pero sí las dimensiones de las nuevas minas perforadas, que casi han duplicado a las antiguas, la mayoría de titularidad privada; en el caso de Canarias esto ha hecho que se mejoren las condiciones de trabajo y de la explotación en sí. Esta tipología de infraestructuras también se han desarrollado en otros sistemas insulares, como el archipiélago de Hawái, Madeira, Sicilia, Malta y también en los continentes (Galería de Los Suizos, Alicante). El futuro de estas minas pasa por una ordenación

de las captaciones, un control de la calidad e hidroquímica de las aguas y la obtención de modelos matemáticos e hidrogeológicos para su óptima explotación.



Figura 10.1; Pozo Canario en Fuerteventura. (Santamarta JC, 2011)

2. Recursos Hídricos subterráneos en Canarias

Los recursos hídricos en Canarias han sido la base de la economía del archipiélago, su conocimiento profundo basado en la ciencia hidrológica, ha hecho disfrutar de una oferta de agua importante, en cantidad y calidad, en comparación a otros medios insulares en otras regiones del mundo. Para llegar a esta disponibilidad, se han necesitado años de trabajo científico, grandes trabajos de ingeniería civil, minera y todo ello apoyado por un enorme esfuerzo de inversores privados y agricultores.

La oferta de los recursos hídricos en Canarias provienen de tres fuentes principalmente; recursos hídricos subterráneos, superficiales, desalación y reutilización; en los últimos años estas dos últimas tecnologías están tomando un protagonismo importante.

Tabla 10.1; Valoración de los recursos hídricos en Canarias y perspectivas de futuro (Santamarta,JC, 2011)

ISLA	RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIALES	RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS	DESALACIÓN Y REUTILIZACIÓN	APROVECHAMIENTO HÍDRICO QUE PREDOMINA	TENDENCIA EN EL FUTURO
Hierro	Nulos	Altos	Bajos	Galería de agua	Desalación
La Palma	Escasos	Altos	Nulos	Galería de agua	Subterráneos
Gomera	Medios	Altos	Nulos	Galería de agua	Subterráneos
Tenerife	Escasos	Altos	Medios	Galería de agua	Subterráneos-Desalación
Gran Canaria	Altos	Medios	Medios	Pozos-Presas	Subterráneos-Superficiales-Desalación
Lanzarote	Nulos	Escasos	Altos	Desalación	Desalación
Fuerteventura	Medios	Medios	Altos	Desalación-Pozos	Desalación

El presente capítulo se centra en los recursos subterráneos, principalmente los obtenidos mediante galerías o minas de agua dulce, los sondeos y pozos, centrándose en la construcción y sistemas de avance y perforación de los mismos. Los sistemas constructivos se ven notablemente influenciados por los factores geológicos de un terreno volcánico y por supuesto su heterogeneidad.

3. Factores geológicos y materiales volcánicos

La actividad volcánica que se produce en los fondos oceánicos trae como consecuencia la formación de las islas. De manera muy general, se puede decir que los edificios insulares se forman por sucesivos apilamientos de coladas, las más antiguas forman el complejo basal que, se puede entender como la base de la isla; aunque en algunas de ellas, aflora en superficie como un material impermeable (Gomera, Fuerteventura...).

De forma general, en Canarias existen dos tipos de materiales con comportamientos mecánicos bien diferenciados:

- Depósitos de lluvia piroclástica, de cínider, ignimbritas no soldadas, oleadas piroclásticas, brechas y cineritas en general.
- Coladas basálticas, traquíticas, fonolíticas, ignimbritas soldadas y autobrechas.

Los primeros, son materiales fragmentarios con tamaños de grano y texturas muy diversas y en general poco compactos y de baja densidad. Presentan baja resistencia mecánica y son fácilmente alterables. Los materiales lávicos, se caracterizan por una resistencia marcadamente más elevada, son más compactos, más densos y masivos. Una mezcla de ambos son los materiales que se van a encontrar en la perforación de la mina (Rodríguez Losada JA, 2004).

Los elementos geológicos más interesantes desde el punto de vista hidrogeológico para una explotación de minería del agua dulce son; los *diques*, *almagres* y las *escorias de base* o de *cabeza* de las coladas volcánicas así como el buzamiento de estas; en el caso de que se haya producido un deslizamiento en la isla de estudio, es necesario integrar en el estudio el efecto del fanglomerado o mortalón, sobre todo los problemas constructivos que generan en la perforación de la mina y su carácter impermeable.

Los *diques* son como paredes o láminas casi verticales y delgadas, compuestas por una roca más densa y compacta, de escasa anchura en la mayoría de los casos (1 - 6 m), que juegan el papel de pantallas impermeables o semipermeables, salvo que estén fisurados o fracturados, no transmiten el agua. Básicamente son conductos de emisión de lava; se enfrían y solidifican sin llegar a la superficie, quedando atrapados al cesar la erupción en las grietas que comunicaban la cámara magmática con las bocas eruptivas. La consecuencia más interesante de los diques es que elevan el acuífero, principalmente en las dorsales de las islas (zonas de mayor pluviometría).

Los terrenos volcánicos recientes, se les pueden considerar como muy permeables excepto, el caso de los *almagres* o *paleosuelos*. Estos se producen cuando una colada de lava procedente de una erupción que transcurre por encima de un terreno con altos contenidos en arcilla, la temperatura de estas coladas, superiores a los 1000 °C, provoca un proceso de rubefacción que impermeabiliza la capa calentada.

Los *almagres* o *paleosuelos* se detectan fácilmente por el cambio de color adoptando tonos rojizos, de ahí la palabra almagre y, se degradan hacia el interior, pudiéndose formar en los suelos, piroclastos alterados o incluso en terrenos de cualquier tipo con tal de que la alteración provoque la presencia de arcillas en su parte superior. Por último, las escorias de base o de cabecera, son vías preferenciales para el movimiento del agua por efecto de la gravedad.



Figura 10.2; Dique atravesando formación volcánica (Santamarta JC, 2011)

En una isla volcánica como norma general donde hay más presencia de precipitación es en las dorsales, generalmente en la cara orientada a barlovento; en los puntos elevados, existen las masas forestales (pinar, laurisilva) que ayudan a la infiltración; también regulan la precipitación de niebla u horizontal, característica de estos medios insulares. Por ello las minas de agua deben estar orientadas hacia las dorsales con suficiente cota para interceptar el acuífero. La cota tampoco puede ser excesiva debido a que, una elevada cota puede suponer aprovechar la parte superior del acuífero, con agua de mejor calidad, pero un descenso gradual de aquél puede suponer el cierre de la explotación.

Hay dos tipos de recursos hídricos que van a drenar las minas, las *aguas de reserva* (altos tiempos de residencia en el acuífero, más cargadas de sales) y las *aguas de recarga*, procedentes de la recarga natural del acuífero, por lo tanto las renovables. Nunca es conveniente drenar todo el agua de recarga, esto no sería sostenible, conviene extraer un porcentaje de la recarga, determinado por los estudios hidrogeológicos y la modelización del acuífero.

4. Minería del agua dulce

Los túneles subterráneos o minas de captación de agua son un método ancestral muy extendido y utilizado. Desde muy antiguo estos sistemas de aprovechamiento del agua se conocen en zonas tan distantes como China, Persia (antiguo Irán), España y Latinoamérica. Las citas más antiguas posiblemente sean las de Qaná, Jericó, Jerusalén, Marrakech y la isla de Sicilia.

Los antecedentes históricos a esta tipología de obras, se encuentran en el siglo VIII antes de J.C., los “*quanats*”, canales subterráneos artificiales que transportan el agua a grandes distancias. Esta explotación de las aguas, generalmente surgidas del drenaje de los acuíferos, se utilizó en Persia, Egipto, India, Grecia y por todo el Magreb en forma de *foggaras* con sus característicos pozos de ventilación.

En el caso del archipiélago canario, si se tienen en cuenta los diferentes aprovechamientos hídricos, la obra magna del ingenio hidráulico canario es la galería o mina de agua. Las minas, que en algunos casos de adentran desde 2.000 m hasta incluso 7.000 m dentro de la formación geológica; las galerías forman auténticos laboratorios de exploración de la hidrogeología insular y forman parte del patrimonio geológico y minero, del archipiélago, con más de 3.000 km de galerías construidos, proporcionalmente más que en toda la zona de la minería del carbón de Asturias y León. En Gran Canaria también existen las galerías de agua, pero en este caso existe una tipología que aprovecha el flujo subálveo de los barrancos, también dependen de la legislación minera y tienen los sistemas constructivos idénticos.

Prácticamente, la mayoría de galerías que hay en Canarias son de titularidad privada, esto unido a unos antecedentes históricos singulares en la propiedad del recurso hídrico, ha condicionado la organización del mercado del agua en las islas. Actualmente la Administración Pública, desde hace unos años lleva ejecutando galerías y minas de titularidad pública con cierto éxito (Los Padrones en El Hierro) en este caso, la sección transversal suele tener forma de medio punto con una anchura útil de 3 a 4 m, paramentos rectos de 1,80 a 2,50 m de altura, cerrada en su parte superior mediante una bóveda de unos de 2 metros de radio. Las galerías de la iniciativa privada eran de dimensiones notablemente inferiores y angostas. Actualmente todas las ejecutadas por la iniciativa pública, generalmente, siguen estas dimensiones lo que facilita su visitabilidad mediante un vehículo, incluso con ramales para la gestión de la circulación de maquinaria.



Figura 10.3; Vista de un almagre o capa de suelo rubefactada en el interior de la mina de agua (Santamarta JC, 2011)

Los tipos de *galerías o minas de agua dulce* son las más convencionales y son horizontales, con cierta pendiente para permitir la extracción de agua por gravedad una vez penetrado en el acuífero. El *pozo galería*, como su nombre indica, se estructura en un pozo de una cierta profundidad con una galería horizontal dirigida a la dorsal de la isla generalmente (zona de extracción). El problema que presentan estas últimas es que, se necesita un gradiente hidráulico que haga que se aproveche el agua como un pozo artesiano (sin aporte externo de energía utilizando un bombeo), un ejemplo es el pozo de Los Padrones en la isla de El Hierro.

Las galerías en trancada son perforaciones que se inician en un tramo descendente, hasta alcanzar el nivel del mar, donde continúan con un tramo horizontal. En Hawái se denominan los *shaft well* o pozos inclinados.

El tramo en descenso está emboquillado en el acantilado costero, con una pendiente de 3:1 o bien 2:1; la mina al llegar al mar o lo que es lo mismo al acuífero costero, se aleja de la costa para captar aguas de mejor calidad, así evitan los efectos de la *intrusión marina* que se verán en secciones posteriores.

La isla con más galerías en trancada es la de El Hierro, ejemplo son galería del Mar de las Calmas, Los Jables, Parador, Tocarón con más de 2.000 m, aunque la que más caudal tiene es la de Ícota, con 70.000 m³ de agua al año. Esta última capta a una cota de

7,6 m sobre el nivel del mar, esta abastece de agua para el consumo a las localidades de La Restinga, Taibique, Las Casas, Isora y San Andrés. La galería de El Parador surte de agua al Parador de Turismo y la galería de Tacorón se utiliza para regadío.

5. Sistemas de avance

Aunque en los terrenos continentales, actualmente ya se dispone de maquinarias avanzadas de excavación y sistemas del control del terreno que permite enfrentarse a todo tipo de material y roca (Cebrián C, 2005), en el caso de los terrenos volcánicos la evolución tecnológica no ha sido tan desarrollada. Esto ha sido debido a, como se ha comentado en secciones anteriores, un terreno muy heterogéneo, anisótropo y difícil de parametrizar y estudiar.

El terreno que conforman en las islas Canarias, es bastante variado en cuanto a su composición, lo que provoca numerosos problemas a la hora de ejecutar una perforación. Esta variedad en cuanto a su dureza, hace muy difícil la utilización de medios mecánicos como *microtuneladoras*, siendo las perforaciones ejecutadas con medios más tradicionales utilizados en la minería convencional. Además hay que destacar que las minas de agua dulce en Canarias no tienen boca de salida por lo que si se utilizase esta tipología de maquinaria debería desmontarse y salir por la bocamina de nuevo (Soler C, 2004).



Figura 10.4; Vista en sección de un pozo con mina de agua horizontal en la isla de El Hierro (Santamarta JC, 2006)

Inicialmente las galerías o minas, eran construidas por medios manuales y con animales, como los burros, para el transporte de herramientas y utensilios; en zonas con presencia de material masivo volcánico, como el basalto era necesario el uso de explosivos muy rudimentarios, incluso a veces fabricados por los propios operarios. Los rendimientos en estos casos dependían de la destreza del *cabuquero* que era el encargado de los explosivos. Los avances analizados eran del orden de 1 a 3 m/d. Los escombros resultantes eran cargados en vagonetas y éstos eran llevados a la superficie mediante fuerza animal o empujados por los operarios (con pendiente de la traza de la galería a favor).

Tanto la explotación, como la dirección de obra y planes de voladuras deben ser ejecutados y realizados por un técnico competente, en este caso particular, los Ingenieros Superiores o Técnicos de Minas, ya que este tipo de instalaciones se rigen por la Ley de Minas. Evidentemente en los estudios hidrogeológicos y de demandas, caben otras cualificaciones y equipos pluridisciplinarios.



Figura 10.5; Máquina vagoneta con pala para extracción de escombros
(Santamarta JC, 2011)

Siguiendo con las técnicas de perforación y avance, complementariamente a los explosivos, se utilizan también en la perforación los martillos neumáticos e incluso mini-excavadoras en las galerías que por sus dimensiones, permiten la entrada y maniobrabilidad, generalmente de uso habitual en las llevadas a cabo por la Administración Pública. El uso de esta maquinaria tiene evidentes ventajas en cuanto a productividad y confort en el trabajo, sobre todo en la zona saturada de la perforación, con presencia de agua.

La mina se suele construir con una alineación recta, aunque en determinadas ocasiones y debido a los materiales que van apareciendo y su orientación (*almagres, buzamiento coladas, piroclastos...*), puede haber cambios de rumbo, incluso ramales en determinados momentos de la excavación; algunos ramales en explotaciones más modernas se utilizan para la circulación de la maquinaria. Estos cambios de orientación puede ser debidos también a los resultados que vaya indicando el *sondeo horizontal*, en el frente de la mina o bien la propia distribución de los *diques volcánicos* que se vayan identificando en la perforación o finalmente por la aparición de zonas saturadas o humedades, lo que hace más que una ciencia, un arte, la perforación de estas minas de agua.

Al inicio de la perforación, los primeros cientos de metros suelen discurrir en seco, es decir en *zona no saturada*, el ambiente de trabajo se vuelve pulverulento. En seco, salvo que haya materiales muy duros tipo basalto o basalto *“piel de perro”* (el más duro según los operarios entendidos en la materia), los rendimientos son elevados y aunque se podrían usar maquinaria de gomas, es conveniente ir instalando desde el principio raíles, para la maquinaria ferroviaria ya que para cuando se alcance la *zona saturada*, la maquinaria de gomas resbalaría y haría más dificultosa la ejecución de los trabajos, retrasando los mismos.

Al cabo de unos cientos de metros la traza de la mina penetra en el acuífero, la denominada *zona saturada*. Este cambio no es inmediato si no gradual, comenzando por la aparición de unas humedades en la base de la traza de la mina, posteriormente en los laterales, la denominada *agua de repisa* en el argot minero insular, hasta finalizar por los hastiales. El agua puede aparecer de golpe tras la ruptura de un dique de cierta magnitud, por lo que es necesario, siempre, llevar un *sondeo horizontal* para conocer que ocurre, tras el frente de la galería, mediante un manómetro se puede tener una idea de la magnitud de la columna de agua. Las fuentes de agua, pueden aparecer en diversas partes de la sección, por fisuras o grietas, con cierta presión, incluso puede llegar a caer agua en forma de lluvia de filtración, en todo el tramo de la sección por lo que las condiciones de trabajo pueden empeorar considerablemente (humedad y frío). Este agua, que suele ser de reserva (más cargada

de sales), puede remitir en cantidad ya que se está drenando la zona del acuífero más antigua, hasta llegar a los caudales estabilizados que serían un porcentaje de la recarga. Es necesario tener cuidado con estas vías preferenciales de agua ya que pueden provocar corrimientos y movimientos del material y caídas de prismas basálticos, generando problemas de estabilidad de la sección de la mina o incluso en la seguridad de los trabajadores.

La mina debe llevar una pendiente descendiente del 1.5 al 2 % en toda su longitud, esto va a favorecer el aprovechamiento del agua que fluye por gravedad, salvo que la infraestructura sea tipo pozo-galería. En este caso se pueden dar dos opciones, la primera es que no haga falta bombear el agua por que se trate de un pozo artesiano o bien, que sea necesario incluir en la instalación un sistema de bombeo, con costes energéticos, que incrementarían el precio total del agua final. Los operarios, para gestionar la pendiente de la galería utilizan tornillos en el arco de la sección con hilos, método rudimentario pero eficaz.

Al alcanzar la zona saturada, o bien al comenzar a atravesar diques es posible que; en la explotación se deba comenzar a trabajar con cantidades importantes de agua, alcanzando temperaturas de unos 15-20 °C, esto provoca un ambiente de trabajo pésimo para los operarios, por lo que esta agua se debe evacuar rápidamente, suelen ser aguas de reserva. La evacuación es mediante bombeo o bien por el canal que se ha ido realizando en la zapatera derecha del frente. Esta agua no es posible utilizarla para abastecimiento debido a que tiene restos de explosivos y materiales sueltos, su posible uso en agricultura llevaría un estudio previo ambiental, por si hubiera problemas de contaminantes perjudiciales. La solución menos eficiente con respecto estas aguas iniciales es verterlas a un barranco próximo, para lo cual también sería necesario disponer del permiso correspondiente. Las altas temperaturas también son un problema para los operarios, en algunas zonas son muy elevadas. Se han dado casos de obtener aguas con temperaturas cerca de 50 °C en el frente de la galería, como en el caso de la galería de Lomo Colorado en la isla de Tenerife, de ahí algunas veces se pueda hablar de *minería de aguas termales*. Otro ejemplo es la galería de La Fuente Santa donde según algunos autores se esconde unas fuentes termales de uso terapéutico, la obra; de gran compleja ejecución y elevado coste, se encuentra actualmente sin explotación.

Hablando en términos geotécnicos; los materiales masivos basálticos son autoportantes por lo tanto estables, como caso general, los problemas en la ejecución suelen aparecer cuando la perforación comienza a atravesar materiales más sueltos, como las *escorias*, *prismas basálticos* o *piroclastos*, que en algunos casos pueden comportarse como un fluido, por ejemplo al atravesar conos volcánicos, como fue

el caso de la perforación de La Fuente Santa, en La Palma, anteriormente comentada. Esto genera problemas de estabilidad a lo largo de la traza de la mina que se suele solucionar con diversas técnicas –que elevan el coste de la explotación considerablemente-, como el *gunitado*, *bulonado* o bien incluyendo el uso de chapas metálicas (a veces con rocas a trasdós). En este último caso es necesario ser consciente que los materiales van cediendo y ejercen una presión sobre las planchas que hace que se estrechen las secciones, caso muy habitual en el Valle de la Orotava en Canarias, también en este caso debido al efecto del *fanglomerado*.

También existen problemas importantes al atravesar materiales plásticos, tipo *pumitas*, que al tomar contacto con el agua pueden funcionar como arcillas expansivas creando serios problemas a la estabilidad de la perforación, este caso significativo ocurrió en la infraestructura denominada *Trasvasur*, una galería de trasvase en la isla de Gran Canaria, en el cual la mina atravesaba formaciones de *pumitas* que iban abombando la galería.

Otro elemento geológico que condiciona la perforación y que hay que tener en cuenta son los deslizamientos históricos en la zona de la construcción de la galería. Los deslizamientos, tales como los ocurridos en la isla de Tenerife, concretamente en el Valle de la Orotava, Güimar, El Golfo en El Hierro, generan una línea de rotura donde se concentran materiales sueltos como rocas, bolos, con una matriz que, al acabar el deslizamiento y con el paso del tiempo forman una capa impermeable que algunos autores denominan *mortalón* o bien *fanglomerado*, denominación última adoptada por el autor Telesforo Bravo. Este mortalón tiene unas consecuencias hidrogeológicas importantes, la primera es que reorganiza la distribución del acuífero al crear una capa impermeable y segundo a nivel de ejecución de las minas, al alcanzar esta capa la sección se vuelve muy inestable y es muy compleja la ejecución de la misma, concluyendo en esta capa la construcción de la mina.

6. Explosivos

Debido a las características y dureza de algunos materiales volcánicos que se atraviesan al ejecutar la mina, se hace necesario utilizar los explosivos como sistema de avance. Se pueden estimar las propiedades del terreno y conocer los materiales geológicos que se van a atravesar consultando bibliografía de trabajos realizados en materiales similares o en explotaciones cercanas.

Un elemento fundamental para la seguridad de los operarios, en la ejecución de la mina de agua, debido a la presencia de gases volcánicos y los gases de explosión de la perforación, es la ventilación de la explotación, los sistemas utilizados en terrenos volcánicos son similares a los usados en las minas del Norte de España, siendo el preferente el sistema de *ventilación flexible*.

Cuando se comenzaron a usar los explosivos como método de excavación se tenía la ventaja de un avance más rápido, pero también más peligroso. La excavación de una galería de agua profunda requiere gran cantidad de voladuras lo que unido a las angostas dimensiones del lugar (1,5 por 1,8 m) vuelve el trabajo minero muy difícil e inseguro.

La perforación de galerías se puede considerar de primera categoría, y se establece, basándose en esta clasificación, el tipo y características de los explosivos a emplear y el plan de voladura.

En el Artículo 24 del Capítulo IV del “*Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera*” se indican las condiciones que debe cumplir una labor subterránea para su clasificación dentro de cada una de las cuatro categorías existentes.

En un terreno volcánico es obvio que no es previsible que en estas perforaciones aparezcan indicios de *grisú* ni de otros gases inflamables.

El esquema de la perforación sería de una manera simplificada como sigue, distinguiendo tres zonas en la sección de la voladura:

- 1) Centro del frente con el fin de crear un hueco justo en el medio (cuele y contracuele).
- 2) Arco superior para desprender la roca y que caiga hacia la parte central del frente (contorno y destroza).
- 3) Cargas de base para separar los escombros de la pared y facilitar la carga posterior de las vagonetas (zapateras).

El empleo de explosivos siempre se realizará de acuerdo con lo establecido en el Capítulo X del Reglamento General de Normas Básicas de Seguridad Minera. De los diferentes esquemas de voladuras que habitualmente se emplean en los frentes de obras subterráneas, se suele optar por el de barrenos paralelos, puesto que con la maquinaria adecuada se obtienen avances y rendimientos aceptables. Se usa explo-

sivo básico la dinamita gelatinosa debido a su alta potencia y buena resistencia al agua. Si las cantidades de agua son considerables, es posible recurrir a tipología de explosivos como los hidrogeles o emulsiones. Los detonadores utilizados, cada vez en mayor desuso, son los eléctricos.



Figura 10.6; Vista del frente de la mina tras limpieza de escombros (Santamarta JC, 2011)

A la vista de que la roca volcánica en muchas situaciones presenta demasiadas fisuras y grietas por ejemplo, en las escorias de la colada, esto hace que los rendimientos en los explosivos utilizados en el frente de la mina sean inferiores que en un terreno homogéneo, como se puede encontrar en un terreno continental, esta situación unida a lo comentado anteriormente, hace que los avances sean menores y muchas veces haya que repasar manualmente las secciones del contorno y las zapateras.

7. Innovaciones constructivas

El mayor problema que tenían las minas de agua es la poca capacidad de regulación que tienen; una vez alcanzada la perforación de la mina en la zona productiva o saturada, consecuentemente se han atravesado una serie de diques (en mayor número conforme se avanza hacia las dorsales), en algunos casos con dimensiones

importantes; la mina entonces, comienza a extraer agua en continuo. Estos caudales inicialmente, son muy elevados aunque se van estabilizando con el tiempo, por ejemplo la galería de Ipalám en la isla de La Gomera comenzó con caudales rondando los 80 L/s y actualmente se obtienen del orden de 5 a 10 L/s , aunque se espera obtener mayor rendimiento de la mina con la construcción de numerosos sondeos a lo largo de la traza para llegar a un caudal razonable en relación al coste de la explotación. Evidentemente, hay épocas del año que no es necesario tanta producción de agua, por lo que se desequilibra la oferta con la demanda, recordando , por este motivo, se comenzó con la *ingeniería de diques* mediante la ejecución de cierres de hormigón armado en las propias minas, utilizando para ello los *diques geológicos* con unas ciertas características de impermeabilidad y geométricas. Lo que se busca con esto es almacenar el agua en el propio macizo y regular el aprovechamiento.



Figura 10.7; Cierre de galería en la Galería de Ipalám en La Gomera (Santamarta JC, 2011)

El primer ingeniero que tuvo la idea de realizar estos cierres fue el Doctor Ingeniero de Caminos Canales y Puertos, Clemente Sáenz García, Catedrático de Geología de la Universidad Politécnica de Madrid, aplicándolos en un acuífero en Soria en la conexión de dos formaciones diferentes, básicamente un contacto hidroestratigráfico de distinta permeabilidad: margas-calizas, el Doctor Ingeniero Sainz de Oiza (responsable técnico del SPA15), también los nombró para el caso Canario. Posteriormente fueron profusamente utilizados en otras zonas del mundo como por ejemplo; Perú, utilizando una falla como dique, en islas de Japón incluso en islas más

cercanas como Sicilia. En Canarias se ha aplicado en el Pozo de Los Padrones en la isla de El Hierro, reconstruyendo tres diques volcánicos usándolos posteriormente como pequeños embalses subterráneos y regulando la explotación a demanda. Esta innovación es muy interesante y ha sido un gran avance para la gestión y optimización de las minas del agua, ya que permite compartimentar el acuífero e ir drenando aguas de recarga a demanda contribuyendo a la sostenibilidad de la explotación además como otra ventaja, se tiene que el agua está almacenada dentro del macizo por lo que se evitan problemas sanitarios.

8. Rendimientos y costes

El mejor sistema para obtener agua del acuífero de las dorsales de las islas volcánicas es mediante las minas de agua dulce o galerías de agua; la calidad en general es excelente (conductividad menor a 400 micro siemens) y, económicamente tienen un coste inferior a la explotación de los recursos hídricos superficiales o los no convencionales como la desalación y reutilización de aguas. La tecnología de perforación es asequible, con una vida útil más de 60 años en términos generales (algunas van camino de los 100 años de funcionamiento).

Los rendimientos actuales de avance se establecen entre 3 y 6 m/d; como costes orientativos el metro lineal de galería, según cálculos realizados suponen 2.100€/m, por lo que el precio medio de una galería en las islas occidentales, de unos 2 km, son 4.200.000 € en términos generales; el coste de la perforación ronda el 60% del presupuesto total del proyecto. No varía mucha de unas islas a otras, salvo por el coste del explosivo, incrementado también por el transporte a *islas no capitalinas*.

A los plazos de ejecución de una obra de esta magnitud, se les debe sumar el estudio hidrogeológico previo que suele durar un año o incluso más, incluyendo la geología, un modelo hidrogeológico y un estudio de oferta y demanda de caudales alumbrados. Los plazos medios de ejecución en Canarias están siendo del orden un año y medio a dos años, para una media de mina de 2,5 km de profundidad, hay que añadir la incertidumbre, una vez que se comienza la perforación, ya que el estudio hidrogeológico en un terreno volcánico no es una ciencia exacta.

9. Conclusiones sobre la minería del agua

Las técnicas comentadas se pueden utilizar en otros entornos geográficos como islas volcánicas como el archipiélago de Madeira, Hawái, Cabo Verde, Sicilia, Galápagos etc. Hay experiencias de cierres de regulación en Perú, con buenos resultados. Se puede utilizar esta tipología de captación como tecnología base, en proyectos de cooperación internacional ya que no necesita recurso energético como norma general.

El futuro de la minería del agua dulce, que antaño ha sido dinamizadora de la economía en Canarias (en las islas occidentales), se encuentra en franco declive, esto es principalmente debido a varias causas entre otras se destacan.

- Los recursos alumbrados están cada vez más cargados de sales y contaminaciones por gases volcánicos, en los que destacan el Flúor (del orden de 4 a 8 mg/L) esto hace que se deba instalar una tecnología de membranas. Básicamente algunas explotaciones están captando agua fósil de varios miles de años de antigüedad.
- La bajada del régimen freático de las islas, hace que las minas localizadas en cotas elevadas se sequen y no sea posible su re-perforación, por lo tanto se finaliza la explotación.
- Los costes de perforación se han incrementado exponencialmente, no ha habido avances tecnológicos importantes, se utiliza minería tradicional, en el sentido de mejora de los rendimientos de los avances o inclusión de maquinaria perforadora por lo expuesto en el documento.
- En la última década el precio y las condiciones de utilización de los explosivos, han condicionado los rendimientos y los costes de esta tipología minera.
- No es una solución a corto plazo para satisfacer una demanda de recursos hídricos, ya que toda explotación debe estar precedida de un estudio hidrogeológico profundo así como un análisis de la cantidad y calidad del agua que se va a alumbrar.
- Pérdida de personal y equipos especializados de perforación.

Se propone, debido a la importancia que tienen estas explotaciones mineras para el conocimiento profundo de la hidrogeología de terrenos volcánicos el establecer un centro de interpretación y formación, en una de estas instalaciones en la isla de Tenerife, lo que se podría conocer como el *hidrogeoturismo*.

10. El pozo Canario

Son obras de perforación excavadas a mano, con un diámetro mínimo de 1,5 m. Su profundidad normalmente es de unas pocas decenas de metros (20 ó 30), aunque se han llegado a alcanzar varios centenares (en Canarias se ha llegado a los 700 m). Si bien el diámetro mínimo, tal y como se ha comentado es de 1,5 m, espacio imprescindible para el trabajo de una persona, es frecuente que supere los 3,5 m, con máximos de hasta 6,5 m. Esto supone que algunas instalaciones tengan que disponer de varias bombas en serie para poder extraer los caudales.



Figura 10.8; Vista del emboquille de un pozo canario en el Puerto de la Cruz, se pueden ver, las vigas transversales, cubilete, revestimiento y *winche*. (Santamarta JC, 2011)

Requieren de una *bomba de achique* para que pueda ser extraída el agua una vez alcanzado el nivel que permita la continuación de los trabajos. También se suele colocar unas vigas de hormigón o acero para disponer el pórtico del *winche*.

Normalmente, y sobre todo en terrenos sueltos como lo son los piroclastos, es necesario revestir la obra con objeto de evitar el derrumbe de las paredes, para ello se utiliza piedra revestida, bloque de material volcánico, cemento o anillos de hormigón prefabricados, colocados a medida que avanza la perforación. Este punto es fundamental para garantizar la seguridad de los operarios, ya que de no ser así, una

pequeña piedra a 400 m de longitud de caída podría perforar un casco. Es necesario incluir una instalación eléctrica con posibilidades de ampliación.

Como norma general los pozos disponen de unas instalaciones auxiliares como son el *winche* para el transporte de materiales y operarios. En su operación y mantenimiento, si son de poca profundidad (20-30 m) se puede disponer de una escalera tipo caracol e iluminar toda la caña del pozo. Algunos pozos son peligrosos en el sentido de tener gases tóxicos por lo que se tendrá que disponer de un dispositivo que detecte este gas o un carburo.

El pozo con más caudal de las islas se sitúa en Tenerife, es el denominado de El Salto con un caudal de 200 L/s. Aunque lo normal son caudales menores, se recuerda por ejemplo caudales de galerías como la del trasvase de La Palma con 120 L/s. a cada lado, El Hierro (Los Padrones) con 80 L/s, galería Vergara en Tenerife con 160 L/s.

Los problemas de este tipo de instalaciones son de dos tipologías; por un lado su ubicación geográfica, la mayoría están en costa, era evidente que ahí a poca cota sería más fácil interceptar la descarga del acuífero, esto ha hecho que muchos estén afectados de intrusión marina y estén sobreexplotados. La otra cuestión es la energética, esta extracción necesita de grandes cantidades de energía, por lo que se creará un *binomio agua-energía*.

Por último, es interesante comentar que muchos pozos canarios, en su base disponen de galerías en profundidad, formando auténticos laberintos, con esto se consigue mayor superficie de captación se podrían asemejar a los pozos en estrella de la isla de Malta en el Mediterráneo.

11. Sondeos

Los sondeos son actualmente, la tipología de obra hidráulica más utilizada, por su rapidez de ejecución y sencillez de instalación, en la presente sección se comentan las singularidades que presentan en terrenos volcánicos con respecto a los terrenos continentales.

Un sondeo es una perforación excavada por medios mecánicos, preferentemente vertical, de diámetro inferior a 1,5 m, aunque los más usuales se encuentran entre los 150 y los 700 mm. Presentan la ventaja de que pueden alcanzar grandes profundidades y tienen un coste normalmente inferior a cualquier otro tipo de captaciones.



Figura 10.9; Sondeo en ejecución en el barranco del Revolcadero en la isla de La Gomera
(Santamarta JC, 2011)

Esto requiere:

- Elemento de rotura del terreno.
- Motor de accionamiento.
- Sistema de eliminación de detritus.
- Sistema de mantenimiento de las paredes de la obra.
- Los sistemas más comunes utilizados en perforación son:
- Percusión.
- Rotación.
- Rotopercusión.

La *percusión* basa su técnica en la fracturación y trituración de la roca por la acción de golpeo de un instrumento pesado.

La *rotación*, se centra en la acción de arrancar partículas por medio de un elemento cortante sometido a una fuerza giratoria y que provoca una rotura de la roca por compresión.

La *rotopercusión*, se basa en la combinación de las dos técnicas anteriores, y es aquella a la que al efecto de golpeo se superpone una acción de giro del útil de perforación.

El sistema de perforación generalmente utilizado para la ejecución de sondeos en terrenos volcánicos es el de *rotopercusión*. El varillaje utilizado es de 6 m usualmente. En un terreno volcánico, hay dos tipos de maniobras; la primera, cuando se está desarrollando el sondeo, uno para terrenos relativamente sueltos como los comentados; aluviales, piroclastos, conglomerados etc.... y otro, para el *terreno masivo o basáltico*, es aquí donde realmente sufre la máquina y descienden notablemente los rendimientos.

Se hace necesario, ir recolectando las muestras de las formaciones atravesadas para el reconocimiento del terreno para la Administración.

Como valores de referencia para este tipo de sondeo y este tipo de material, es recomendable, usar un momento en la cabeza del sondeo de 50 kg por m, para una máquina de un solo compresor, es conveniente incluir 12 bares de presión.

Por último es conveniente hablar de rendimientos, aunque realmente el rendimiento lo va a condicionar la experiencia del operario, que en este campo es fundamental.

Como dato orientativo, se facilita el siguiente valor de 8 a 10 m/d con una jornada de 8 h, aunque se reitera que depende de bastantes factores y el más limitante el tipo de formación a atravesar y la destreza del operario.

Los costes para la realización de un sondeo en un terreno volcánico difieren notablemente de los costes en terrenos continentales, esto se puede deber en una primera estancia, a que el terreno volcánico presenta mayor dificultad para ejecutar el mismo, debido a la heterogeneidad del terreno y a la dureza que presentan los basaltos, en caso de atravesar este tipo de formación. También influye que hay menos competencia entre las empresas dedicadas a los sondeos.

Se puede determinar que en Madrid un coste de sondeo medio puede ser del orden de 250 €/m (2009), para un terreno detrítico, como norma general, es obvio que la dificultad en este caso es mucho menor que en un terreno volcánico, así como los rendimientos.

En el caso volcánico; se ha calculado mediante la observación y ejecución de varios sondeos a lo largo de las islas; en este coste calculado no se incluye el conjunto de

inversiones que incluye una perforación (p.ej.: equipamientos posteriores: tubería de revestimiento, de elevación, grupo bomba-motor, etc.). En general el coste es algo que dependerá de cada instalación, con enorme influencia de diámetros y profundidades, sólo el coste de perforación, contemplando cualquier tipo de terreno, mediante tecnología de *rotopercusión*, podría estar más próximo de los 300-400 €/ml (2009). En cualquier caso, la profundidad tiene una enorme incidencia, porque el coste de instalación y desmantelamiento de la maquinaria de perforación, puede estar incluido en el precio del ml para grandes profundidades; sin embargo, puede ser una partida única al margen del coste por ml para sondeos poco profundos y no de menos de 2.000-3.000 € (2009) por sondeo.

En otro orden de cosas, los pozos profundos admiten abordar el proyecto a precio cerrado, pues el menor margen del contratista por cambios en el terreno (entiéndase menor productividad de la máquina) puede ser más fácilmente asumido.

En otro tipo de sondeos, aquellos de 50 m o menos de profundidad, donde haya indicios de terrenos de difícil perforación (masivos), será muy difícil obtener un precio cerrado, contratándose *por administración* y por tanto, con un precio resultante que dependerá de cada caso y cuyo promedio es difícil de estimar por no tener documentación objetiva al respecto.



Figura 10.10; Sondeo en ejecución en el barranco del Revolcadero en la isla de La Gomera (Santamarta JC, 2011)

Bibliografía consultada y referencias

- CEBRIÁN BENJAMÍN (2005); *Voladuras y Túneles*. Cuadernos Monográficos de la UEE. Nº1. Madrid.
- RODRIGUEZ LOSADA JOSE ANTONIO (2000); *Las islas Canarias y el origen y clasificación de las rocas ígneas*. Universidad de La Laguna. Tenerife.
- SANCHIDRIÁN, JOSE ANGEL Y MUÑIZ E. (2000); *Curso de tecnología de Explosivos*. Fundación Gómez Pardo. ETSI Minas. Universidad Politécnica de Madrid.
- SANTAMARTA CEREZAL, J.C. (2011); *El agua en Canarias; Historia, Ciencia y Tecnología*. Boletín Anual Nautis et Incolis 9 (4ª época) .Tenerife.
- SANTAMARTA CEREZAL, J.C. RODRIGUEZ MARTÍN, J. (2011); *Sistemas de avance y perforación en la minería de agua dulce en terrenos volcánicos*. Revista Ingeopress Vol. 170. Pág. 22-40. Madrid.
- SANTAMARTA CEREZAL, J.C., HERNÁNDEZ L.E., RODRÍGUEZ LOSADA, J.A. (2010). *Volcanic rock mechanics-volcanic dikes engineering properties for storing and regulation of the underground water resources in volcanic islands*. Balkema Ed. Países Bajos.
- SANTAMARTA CEREZAL, J.C (2009); *La minería del agua en el archipiélago canario*. De Re Metallica. Sociedad Española para la Defensa del Patrimonio Geológico y Minero. Madrid.
- SOLER LICERAS, C. (2004); *Obras y Aprovechamientos Hidráulicos*. Notas de la asignatura. Universidad de La Laguna. Inédito. Tenerife.

El transporte hidráulico

Francisco Suárez Moreno
Juan Carlos Santamarta Cereza
Amanhuy Suárez Pérez

1. Introducción

El agua en las Islas Canarias se transporta mediante acequias, tajeas, canales y tuberías, parte de las cuales constituyen un valioso patrimonio cultural ni protegido ni usado como activo económico si tenemos en cuenta que en Madeira, las mencionadas *levadas*, forman parte de los itinerarios de turismo cultural y ecológico más encantadores de la Macaronesia, lo que muy bien se podía hacer en muchas de las históricas acequias y canales sobre todo de La Palma, Tenerife y Gran Canaria.

Pero las conducciones actuales del agua en cantidades significativas se hacen a través de canales, que son vías artificiales, en las que el agua circula sin presión, es decir en contacto continuo con la atmósfera. Inicialmente los canales se construyeron, entre finales del siglo XIX y principios del XX para el transporte del agua desde los nacientes a los centros de consumo. En ellos, el agua se desplaza por gravedad sin consumo energético esto implica que el diseño de las pendientes debe ser lo más eficiente posible. Y con la particularidad de que los más kilométricos son de trasvase de las zonas húmedas de barlovento hacia el árido sotavento donde primero cultivos de exportación, sobre todo de tomates, y luego los polos de desarrollo turístico demandaron mucho caudal.

2. Arquitecturas hidráulicas de captación y conducción: madres, azudes, acequias y canales

La sociedad indígena canaria se valió de sencillos azudes de piedra y barro para desviar el agua de los barrancos hacia pequeña canalización que las conducían a los poblados y zonas donde desarrollaron las primeras estrategias agrícolas, sobre todo en Gran Canaria. De las fuentes y manantiales así como de hoyos denominados *eres* (bereber iris = pozo u hoyo hecho en la arena para captar agua de reservas subálveas), aprovecharon las aguas del subsuelo. En las montañas excavaron conjuntos de “piletas” y una red de canalizaciones para captar las aguas pluviales así como las manantes, para uso doméstico y pecuario o, en su caso religioso, como estudiaremos más adelante. Y en los cursos de agua de barrancos se seccionaban con paredes de piedra para retener las aguas como es el caso de algunas obras que han perdurado en La Palma conocidas como tranques (Pais et. al., 2007).

Las primitivas redes de captación y conducción de las aguas de diversa procedencia finalizaban en pequeños y medianos recipientes de almacenamiento y regulación de las aguas para uso doméstico, agropecuario y artesanal que tanto podían ser pocetas excavadas en la roca como charcas o albercas de muros de piedra y barro o maretas, como veremos más adelante. Por tanto desde la época aborigen, y luego en los siglos siguientes hasta la actualidad, las captaciones de las aguas manantes y pluviales se han trazado desde su origen o *madre del agua*, tras quebrar los cursos con *azudes* o *tomaderos* para encauzar el agua por una conducción principal (*acequia real* en las islas realengas), hasta las zonas de regadío. Destacan como manantiales y cursos de agua muy caudalosos, entre otros, los de Marcos y Cordero en La Palma; El Barranco de Badajoz (Güímar), el Río de Taoro (La Orotava)... en Tenerife; la mina de Tejeda, las Madres de Valleseco-Firgas, el Agua del Palmital... en Gran Canaria.

La primera gran obra hidráulica que acometen, a poco de conquistarse las Islas, los colonizadores europeos, es el trasvase de aguas de la *Mina de Tejeda* (Gran Canaria), una canalización y túnel que capta el agua de un histórico nacimiento situado en la cabecera de la cuenca de Tejeda y lo desvía a la vertiente norte por un largo túnel que asoma al municipio de San Mateo. Se proyecta en 1501, cuando los Reyes Católicos conceden al Cabildo de la Isla la gracia de disponer como bienes de propios las aguas de aquel caudaloso manantial que brotaba en la cabecera de la cuenca de Tejeda. Para ello fue necesario un costoso trasvase hacia la vertiente de barlovento y llegada a la ciudad, en diferentes tramos. La canalización del manantial hasta el túnel, una acequia de unos 1.846 m, fue excavada en la roca con algunos tramos de mampostería ordinaria. El túnel es una perforación en la roca de unos 289 m de

largo por donde las aguas alcanzaban la otra vertiente, con una sección rectangular, algo irregular y muy estrecha, que parece dar razón al planteamiento de que se fue realizada con mano de obra esclava infantil. Se hizo desde direcciones opuestas, con un ligero error de unos centímetros que determinó un escalón de desnivel en la mitad del trayecto en dirección a su salida y finalizado en 1526. Y la acequia barranco abajo, sin grandes obras de fábrica que llevaba el agua hasta la ciudad de Las Palmas, a lo largo de unos 44 km. en cuyo trayecto, desde la misma salida del túnel hasta El Batán, se fueron instalando unos 20 molinos de agua, uno de los aprovechamientos energéticos más interesantes de Canarias.



Figura 11.1; Túnel de la Mina de Tejedal (Gran Canaria) la primera gran obra hidráulica de Canarias. Acequia Real (Firgas), gran obra de canalización con argamasa de cal y cantería noble de Arucas (ignimbritas). (Fco. Suárez)

Para la construcción de las primeras acequias se emplearon materiales del entorno próximo a cada una; en las zonas más húmedas y de abundantes bosques se empleó la madera para la fabricación de canales (esteos) sobre todo para salvar los desniveles de los barrancos y laderas, que enlazaban a los tramos llanos de cada acequia que conllevaba una obra de fábrica de las que muchas se conservan como bienes patrimoniales hidráulicos. Estas acequias principales son excavaciones reforzadas con muros de piedra o con obra de fábrica en mampostería ordinaria, similar a las *levadas* de Madeira. Para salvar la orografía más complicada, desde muy antiguo no sólo se utilizaron los canales de madera sino que se abrieron túneles y se excavaron tramos a cielo abierto en la roca e incluso se emplearon sillares de cantería que, en algunos casos, son verdaderos acueductos sobre arcadas de piedra. Desta-

camos el trazado espectacular construido por el Condado de la Vega Grande en el barranco de Fataga (Maspalomas, Gran Canaria), las arcadas del barranco de Santos (Tenerife), el acueducto de “Los Siete Ojos”, en el Barranco de Tafuriaste (Tenerife), entre otras.



Figura 11.2; Canal de madera en la isla de El Hierro. (Santamarta JC, 2012)

Las acequias principales disponen, a lo largo de su recorrido, de *quebraderos*, para desvíos a otras acequias secundarias; aliviaderos o *rebosaderos* para evitar que un desbordamiento la destruya; *decantadores* para retener los sedimentos y *filtros* en forma de rejillas. Las acequias de dimensiones reducidas se denominan también *tajeas* o *artajeas*, siendo de las más espectaculares las excavadas en la toba blanca de la falda sur del Teide, por Arico y Granadilla. Asimismo acomodan en sus bifurcaciones unas arquitecturas que miden con precisión los caudales desviados, pesadores o cantoneras que estudiaremos más adelante.

Las acequias históricas de las zonas húmedas son numerosas, algunas kilométricas en su descenso desde la cumbre hasta la costa, como es el caso de la Acequia de la heredad de la Mina de Tejeda, en Gran Canaria, que llega después de atravesar en la Cumbre un túnel a la ciudad de Las Palmas; o la Acequia Real de La Orotava, que nace en las faldas del Teide y alcanza la costa en El Puerto de la Cruz; o la gran acequia en piedra azul de la Heredad de Arucas-Firgas, que ha tenido variaciones en el trazado a lo largo de la historia desde Las Madres en Valleseco-Firgas.

Un capítulo importante de la hidráulica histórica canaria es la transferencia tecnológica del transporte y gestión del agua, como estudiaremos en otros apartados, hacia el Nuevo Mundo, a lo largo de los siglos XVIII y XIX, con especial incidencia en Caracas (Venezuela) y San Antonio de Texas (Glick, T.F. 1972) (Hernández G., 2000 y 2001).

El sistema de transporte hidráulico cambia en el siglo XX, cuando se trazan las grandes redes de canales, las que en un medio insular como el canario deben salvar una orografía, en algunos casos muy abrupta, que puede provocar que se deban utilizar soluciones de ingeniería que en ocasiones son muy complejas y costosas como los sifones. En los sifones el líquido tiene un recorrido similar a una U y puede salvar importantes desniveles cuando no son solucionables mediante acueducto (altura elevada). De todas formas en Canarias en la mayoría de los casos, por economía, la ejecución de canales se diseñó para intentar salvar los barrancos siguiendo las curvas de nivel del terreno y respetando la pendiente de la traza del canal, no obstante existen grandes sifones a lo largo de la geografía del archipiélago, Adeje, Guímar, los Silos...

Los canales modernos, disponen de una serie de obras e instalaciones auxiliares, en las islas se pueden identificar las siguientes.

- Captaciones, bien procedentes de galerías o de obras de toma de barranco.
- Compuertas y Vertederos, para derivaciones, cantoneras de distribución, medición de caudales y control de niveles.
- Sifones y Acueductos, o puentes (mampostería, madera, metálicos), para atravesar barrancos.
- Galerías excavadas en el macizo, para atravesar obstáculos naturales, a veces con iluminación natural.
- En canales para encauzamientos (de mayor dimensión) evacuación de aguas de lluvia y drenaje disponen de rampas, escalones y disipadores de energía, para controlar las velocidades por las altas de alta pendientes.
- Estructuras de entrega y recepción de canales.
- Aliviaderos.



Figura 11.3; Canal con escalones en Teguise, Lanzarote (Santamarta JC, 2010)

Los canales tienen unas características geométricas tales como, la sección transversal, la pendiente longitudinal, definida como el cociente entre el desnivel del fondo y la longitud que hay entre estos dos puntos de distinto nivel, a nivel constructivo están realizados de varios materiales, desde madera de pino de tea (La Palma), mampostería, piedra tosca, hormigón incluso excavado en roca o en el terreno.

Todo el archipiélago está cubierto de canalizaciones y conducciones, si bien en la isla de Tenerife existe el mayor número de kilómetros construidos, casi 5.000. Las conducciones han cambiado su función, si antiguamente se colocaban en manantiales, como se ha comentado, actualmente se utilizan para el transporte de caudales desde las galerías, presas o balsas hasta los depósitos reguladores para su posterior consumo.

En relación al transporte de aguas, las galerías otorgan una ventaja en este sentido, al estar en zonas elevadas de la isla, en general no se necesita bombear el agua para su transporte a las zonas de consumo que suelen estar en la costa; de idéntica forma los depósitos reguladores están en zonas estratégicas con cierta altura piezométrica para poder abastecer a los núcleos poblacionales que, en las islas, salvo algunos casos se encuentran en zonas costeras o de menor altitud. Lo cual supone un cierto ahorro en el consumo energético.

Las canalizaciones y los trasvases de las zonas productoras hacia las zonas consumidoras han generado un desarrollo importante y fundamental en las islas Canarias, notorio es el caso del Canal del Sur en la isla de Tenerife después de la Guerra Civil española. No hace mucho tiempo, antes del desarrollo turístico de la zona Sur de Tenerife, esta parte de la isla estaba muy condicionada por una precipitación muy escasa y una agricultura de subsistencia, con ausencia de explotaciones de agua subterránea de importancia, lo que llevó a plantear un canal de las zonas productoras de Arico y Fasnia hacia el suroeste insular, esto hizo desarrollarse de manera notable esta área olvidada en el más amplio sentido, agrícola, población y turismo (Rodríguez, W., 1995).

No menos importantes son los canales que se trazan en la primera mitad del siglo XX, en las islas de Tenerife y Gran Canaria tanto para el trasvase de agua de una parte a otra de cada isla como desde las grandes presas hasta las zonas de cultivo de la costa cuyas plantaciones de plataneras y tomateros demandaron una gran cantidad de agua. Estas grandes obras hidráulicas, hoy históricas, se trazaron con gran dificultad plegándose al terreno montañoso, salvando obstáculos con largos túneles y trabajosas arcadas, capaces de transportar entre 100 y 1000 L/s. En la construcción de los primeros se empleó mampostería ordinaria con el aglomerante canario de la cal hidráulica y luego con alguna mezcla de cemento portland de importación además de piedras, cantos o sillares en su caso de materiales volcánicos extraídos de canteras de tobas y de diversos depósitos de nubes ardientes de nuestras islas sobre todo de los mantos pumíticos del Sur de Tenerife o de los célebres depósitos de la Montaña de Gáldar en el norte de Gran Canaria de cuyas canteras encontramos estos cantos en canales antiguo; aunque más tarde se generalizó el empleo del hormigón y en algunos casos mampostería hormigonada.



Figura 11.3; Compuerta en un canal del Sur de Tenerife. (Santamarta JC, 2007)

Sólo en la isla de Tenerife existen casi 4.000 Km construidos. Destacamos el *Canal de los Mil*, que discurre por encima de la cota de los mil metros de altura, sobre Güímar (Tenerife), a través de nueve túneles y plegado a un terreno montañoso mediante obra de fábrica en unos tramos a cielo abierto y en otro cubierto, otros igual o mayor importancia son el de Vergara que desde La Guancha, en el Norte bordea seis municipios llega hasta llegar al municipio sureño de Guía de Isora, entre otros canales que desde la zona húmeda de barlovento llevan agua hacia las tierras de sotavento para lo cual casi todos tuvieron que valerse de acueductos de mil formas que evidencia esa dialéctica del canario con su Naturaleza, hoy patrimonio cultural tangible de gran valor. Tuvo gran importancia para el regadío de las tierras del Sur de Tenerife el Canal del Sur y el Canal Intermedio (1941-1950) que conducían desde Este a Sur las aguas de una densa red de galerías, lo que supuso la reactivación económica de aquella comarca con los cultivos de exportación (Martín M., 1991).



Figura 11.4: Acueducto Los Sietes Ojos, en el barranco de Tafuriaste, Puerto de la Cruz, Tenerife (Rafael Gómez).

En Gran Canaria es otra de las islas con gran densidad de grandes canales que conducen el agua de las presas del interior a las zonas bajas tanto de cultivo como de urbanizaciones, en gran parte de sus recorridos mediante túneles kilométricos. Un inventario realizado en 1972 dibujaba un total de 152,7 kilómetros de canales y 534 km de grandes tuberías (González G., 2010) cuando aún faltaban la finalización de otras redes. Por destacar alguno lo hacemos con el Canal de La Lumbre o Canal de Soria que llega desde el interior (Soria) hasta Maspalomas a lo largo de 25 km. No menos importante en su momento como conducción de aguas y hoy como bienes patrimoniales es la red de tuberías de cemento en esta isla, siendo las primeras fabricadas por un histórico empresario, ingeniero agrícola inglés y técnico en tecnología

y materiales hidráulicos: mister Leacock (Guía-Gáldar) en su establecimiento de la playa de El Agujero (Gáldar), unidades denominadas popularmente como “tubos de mister Leacock” que exportó a todas las Islas.

3. Estrategias y arquitecturas hidráulicas para gestionar y aforar los caudales

En el origen de nuestra historia del agua, cuando según avanzaban los primeros siglos de la colonización europea, cuando los caudales que desde la cumbre llegaban a los cultivos de la costa se fueron privatizando o en su caso fraccionando por efecto hereditario, se precisó primero de un órgano de gestión administrativa y a su vez de propiedad: la *heredad*, que llevaba intrínseca una serie de elementos físicos y estrategias de gestión; y, segundo un sistema de distribución física del agua cuando había que derivar a un lado y a otro fracciones de la gruesa de la acequia principal.

La distribución del agua a través de las acequias de cada heredad estuvo, como ya estudiamos, desde un principio controlada a través de rigurosos turnos, las *dulas*, cuya cantidad proporcional a cada partícipe varía según el volumen principal o *gruesa de agua* que la heredad disponía en cada momento, para lo que dispone de un oficial repartidor con diversas denominaciones por islas o comarcas (*vigilante, canalero, acequiero, ranchero...*). La *gruesa de agua* se va fraccionando a lo largo de las canalizaciones hasta la cantidad asignada a cada partícipe. Para desde su nacimiento o *madre del agua* discurre por la acequia matriz o *acequia real*. Para la distribución adecuada a cada partícipe se conformó, en cada heredad, un sistema de medida de temporal (día, hora y minuto) que según su caudal o zonas geográficas tenía y tiene aún diversas denominaciones: *azada, cuarta, surco, paja, hilo de agua, pipa*, etc. En Gran Canaria subsiste la *azada*, medida de volumen en unas zonas (el acumulado a lo largo de 12 horas por un caudal) o de fluidez, variable según zonas, entre los 9-10 litros por segundo. En Tenerife y las islas occidentales se ha mantenido la unidad de la *pipa* (480 litros).

Para repartir con estas medidas se necesitó una arquitectura que hiciera de llave. Se había introducido desde Madeira, desde los primeros años de la Colonización una curiosa obra de madera o de obra de fábrica en su caso: un medidor/distribuidor denominado, *caja de agua, arquilla, tronera, cantonera...* Estos medidores llevaban en un principio unas pocas tornas o troneras, con una pequeña compuerta de madera, de huecos milimétricamente precisos para calcular bien el caudal a desviar. Pero según pasa el tiempo, la mayor complicación de las desviaciones por los frac-

cionamientos hereditarios determinó que se hicieran conjuntos de medidas-distribución del agua más complicados. Es cuando estos pesadores del agua, adquieren una plena identidad lo que podemos ubicar ya en el siglo XVIII.

Las *cantoneras* o pesadores de agua más comunes que hemos heredado como legado patrimonial hidráulico constan de dos o más estanques de pequeñas dimensiones, intercomunicados por el fondo, aunque en los más variados diseños arquitectónicos. En estos caudalógrafos, el primer recipiente recibe el agua de la acequia por el fondo o por la superficie del mismo y para que esta se estabilice y rebose ya remansa por cada una de las bocas o troneras, el agua pasa por uno o por varios recipientes comunicados por el fondo de los mismos. Las bocas o troneras están en función de las necesidades de reparto del agua de cada lugar y de acuerdo con las medidas de fluidez que son distintas en cada zona.



Figura 11.5; Cantonera Galería de Amance (Tenerife). Con troneras de base angular. Al fondo la salida del agua de la galería.(Fco. Hernández, 2004)

En unas cantoneras sus troneras llevan unas regletas graduadas marcan la medida de salida del agua. Esto requiere una gran precisión milimétrica y experiencia de construcción pues para medir la salida del agua estas obras del ingenio tecnológico popular responden con precisión los principios de la Hidrodinámica (González Rodríguez,1991 y 2006).Por ello las troneras son de diferentes dimensiones y la altura del agua no se puede medir por la tronera de salida sino por otra tapada además de muchas más estrategias que los acequeros conocían a la perfección. Para una salida de agua de 10 litros por segundo (azada antigua del Norte de Gran Canaria)

por una tronera, ésta debía tener una abertura de sección cuadrangular con una planta de 25 x 25 cm y alcanzar el agua desalojada, mansamente, una altura de 9 cm. Para fracciones de azada las medidas disminuyen en la proporcionalidad adecuada para la obra de fábrica de la tronera menor ($1/2 = 12,5 \times 25$ cm y $1/4 = 6,25 \times 25$ cm). Las cantoneras más antiguas están asociadas a los heredamientos y se ubican en el curso de las acequias reales mientras que las modernas son de las comunidades de regantes y muchas se ubican no solo para distribuir las aguas de pozos, grandes estanques y canales sino también a la entrada de presas y maretas para medir los caudales de entrada.

En Gran Canaria los catálogos etnográficos contabilizan un total aproximado de medio millar, tanto a cielo abierto como dentro de habitáculos, las *casillas del agua*. Estos se construyeron para asegurar el reparto y medida del agua ante los hurtos. Los mejores ejemplos lo tenemos en las cantoneras de la heredad de Arucas-Firgas, en el Norte de Gran Canaria, levantadas con la emblemática cantería azul de Arucas.

En Tenerife estas arquitecturas denominadas ‘arquillas’, ‘desbastadores’, ‘tanquillas’ tienen un modelo constructivo similar a los de Gran Canaria aunque no existe tanta variedad ni complejidad de troneras y los materiales por lo general son de mampostería ordinaria; aunque observamos que las troneras disponen de una base angular y no recta. Hasta el siglo XVIII y principios del XIX dada la abundancia de madera de pino algunos de estos medidores de agua se construían con gruesos tablones, de lo que solo queda el vestigio de algunos documentos escrito y dibujos de incalculable valor.

Pero, como ya indicamos hoy, las modernas llaves de distribución, en las nuevas redes de tubos de plástico que sustituyen a la infraestructura tradicional, han puesto en desuso tanto a las acequias como las cantoneras, con grave peligro de desaparición. Como bienes patrimoniales requieren en primer lugar un catalogamiento en cartas etnográficas municipales. En Gran Canaria se han catalogado oficialmente en las cartas etnográficas, tanto a cielo abierto como dentro de las denominadas casillas de agua, un total cercano al medio millar, aunque la cifra real es superior; casi todas en desuso y en peligro de desaparición y en algunos municipios se han realizado esfuerzos de protección y difusión cultural y didáctica en las escuelas e institutos.

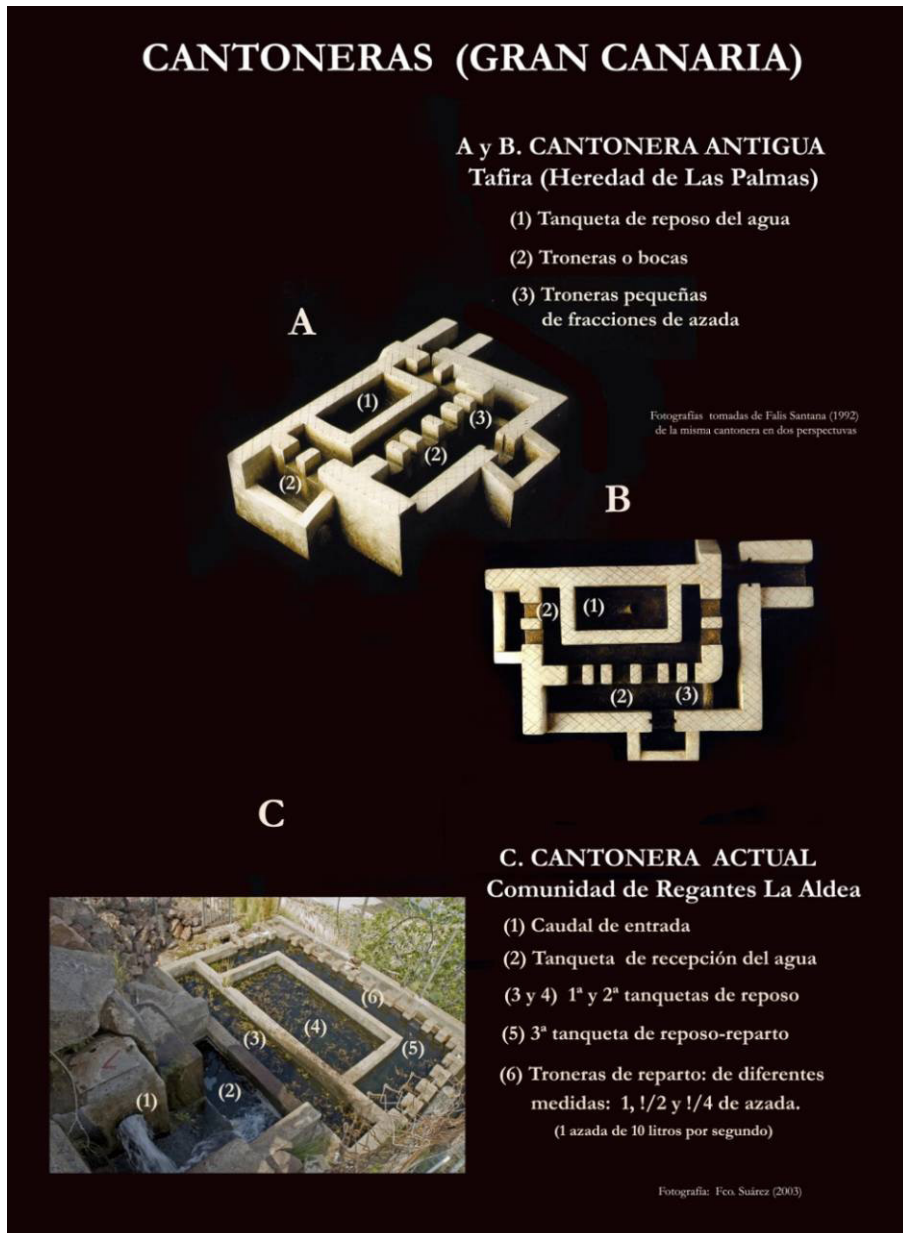


Figura 11.6; Dos modelos de cantoneras de Gran Canaria, con sus correspondientes partes. Composición de Amanhuy Suárez (2011)

4. Nuevas tecnologías para el transporte de aguas

El transporte de los caudales a suministrar se realiza desde los puntos de captación hasta los núcleos de población, a través de canales y tuberías, que se extienden como un auténtico sistema circulatorio bajo la superficie del terreno. Mientras los canales efectúan el transporte en lámina libre y forman la red principal, las tuberías lo hacen a presión y constituyen las arterias secundarias hacia cada centro a abastecer. En Canarias, la gestión de la práctica totalidad de la red de transporte de aguas, es en general, privada, realizada por sus titulares mediante la fórmula de *Comunidades de Agua* (comunidades de transporte de aguas) aunque también las hay por gestión pública.

4.1. Tipología de conducciones

Las características de estos sistemas de transporte depende de la época de su construcción, generalmente las conducciones son de hormigón combinado en algunos tramos con acero, principalmente para salvar los innumerables sifones que se deben hacer para atravesar los desniveles de los barrancos. También existen conducciones de fibrocemento y de acero galvanizado. Los canales antiguos son de mampostería progresando hasta una solución mixta mampostería-hormigón.

Las tuberías también han sido ejecutadas con diversos materiales, aunque relativamente desde hace poco se utilizan las de materiales plásticos, salvo para grandes bombeos que se utiliza generalmente las de fundición dúctil. El plástico se utiliza principalmente por el ahorro en los costes de instalación, ya que se trataba de materiales más baratos, y su utilización también supone una mayor seguridad en las instalaciones y durabilidad a largo plazo, fácil instalación y rápida, además se puede disponer de numerosas formas y elementos auxiliares.

También el uso de las tuberías plásticas supone otra ventaja en el sentido de que en Canarias existen algunas hidroquímicas muy agresivas en ciertos tipos de agua, un caso singular son los precipitados de carbonatos que hacen reducir la sección de las conducciones, reduciendo su eficiencia y función.

Las tuberías utilizadas para el transporte de aguas en Canarias se pueden clasificar en;

- Tuberías de plástico
 - Polivinilo de Cloruro (PVC).
 - Saneamientos.
 - Polietileno (PE).
 - Acometidas.
 - Transporte de aguas.
 - Poliéster reforzado de fibra de vidrio (PRFV)
 - Saneamiento
- Fundición.
 - Dúctil
 - Gris
- Acero.
- Fibrocemento (actualmente ya no se utiliza).
- Hormigón.



Figura 11.7; Tubería de aguas residuales en Tenerife. (Santamarta JC, 2011)

4.2. Problemas en las redes de transporte

Como se ha comentado, las conducciones en las islas son muy extensas, relativamente antiguas, dispuestas en localizaciones de difícil acceso; las redes de transporte también, son muy difíciles de controlar y mantener de una manera eficiente, por lo que se generan problemas en la gestión de la red. En las islas occidentales; existen una serie de problemas en las infraestructuras del transporte que se pueden sintetizar en los siguientes;

- Excesivo número de conducciones.
- Dificultad de gestión y mantenimiento.
- Pérdidas en las conducciones.
- La entrada de tierras y piedras ocasionadas por desprendimientos.
- Vertido de sustancias de todo tipo.
- El crecimiento de algas verdes en los períodos de mayor insolación, procesos de eutrofización.
- Entrada de piedras, restos vegetales, tierras en laderas por donde discurren.
- Rotura de conducciones por impacto de troncos de árboles, desprendimientos de rocas y deslizamientos del terreno.
- Evaporación.
- Falta de mantenimiento en ciertos tramos.
- Falta de cobertura, tapas, cierres en tramos.
- Mezcla de aguas de diversas calidades, empobreciendo la mezcla final.
- Oxidación y colapso de conducciones metálicas.
- Complejidad de acceso a los canales que transcurren por las zonas altas de las islas.

- Complejidad en la medición y reparto de caudales.
- Multitud de líneas de transporte, dificultad de gestión colectiva.
- Dispersión en la tipología y materiales de los que están contruidos las líneas de transporte.

Otra característica singular es el gran número de caudales de agua perdido debido a las fugas en las líneas; hay casos en la isla de Tenerife bastante alarmantes, se están intentando solucionar aunque es bastante complejo. Según el PHI, las pérdidas en las conducciones son estimadas con valores según la tabla 11.1; para tener una referencia de otra región conviene recordar que Israel, es el país que más recursos económicos invierte en evitar las pérdidas de agua en las conducciones; estas en total suman un 13% de media en todo el estado.

Tabla 11.1; Diferentes estimaciones de pérdidas en conducciones comparadas con el global de Israel. (PHI isla de Tenerife, modificado Santamarta JC)

ÁREA DE ESTUDIO	% EN PÉRDIDAS EN CONDUCCIONES
Israel	13 %
Los Silos	69%
Garachico	68%
El Sauzal	61%
S. Juan de la Rambla	61%
La Matanza	60%
La Guancha	59%

Las zonas con menos pérdidas son; La Laguna (17%), Guía de Isora (19%) y Santa Cruz de Tenerife (21%) (PHI de Tenerife). En las islas no capitalinas no se tienen referencias de pérdidas tan importantes, aunque sí que las hay, como por ejemplo en la isla de La Gomera, particularmente en su capital, San Sebastián, donde se daba la circunstancia que las pérdidas en las redes eran mayores en los periodos nocturnos que en los diurnos debido al incremento de la presión en las líneas, actualmente se ha mejorado notablemente esta circunstancia.

En algunas localidades se está trabajando en detectar y minimizar las pérdidas de agua, mediante la detección de fugas por geófonos. Los procedimientos de detección para estas fugas de agua siempre siguen el mismo procedimiento; inventario de líneas, planificación de las mediciones, detección mediante equipos nocturnos.

En superficies muy extensas se pueden utilizar equipos correladores y prelocalizadores para acotar la zona de fuga agua y posteriormente se verifica con geófonos.

Igualmente se utilizan equipos de gas trazador, equipos de microondas, georradar y otros métodos para confirmar el punto de fuga con la mayor precisión posible.

Bibliografía consultada y referencias

- GALVÁN GONZÁLEZ, E. (1996): *El abastecimiento de agua potable a Las Palmas de Gran Canaria: 1800-1946*. Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria. Las Palmas de Gran Canaria.
- GLICK, T.F. (1972): "The Old World Background of The Irrigation System of San Antonio, Texas", en *Southwestern Studies Monograph* N° 25. The University of Texas at El Paso. Texas Western Press.
- GÓMEZ GÓMEZ, M.A. (2006): «La vida en torno al agua. Usos y aprovechamientos históricos», en *Agua del Cielo. Documentos para la Historia de Canarias*. Gobierno de Canarias. Dirección General del Libro, Archivos y Bibliotecas. Archivo Histórico Provincial de Santa Cruz de Tenerife. San Cristóbal de La Laguna.
- GONZÁLEZ GONZÁLEZ, J.J. (2010): *Canales y tuberías hasta 1972. Gran Canaria. Un inventario de bienes de interés etnográfico...*
<http://www.presasengrancanaria.com/p/descarga-de-articulos.html> (c. 15-XI-2011).
- GONZÁLEZ RODRÍGUEZ, J. M. (2006): "De gruesas, dulas, cantoneras y otros sistemas de regulación del caudal en los nacientes y atarjeas de Canarias", en *La Cultura del Agua*, Anroart Ediciones, Las Palmas de Gran Canaria, pp. 251-268.
- HERNÁNDEZ GONZÁLEZ, M. (2000): "Los artesanos canarios en la Venezuela colonial: los constructores de acequias", en *El Pajar. Cuadernos de Etnografía Canaria*, n° 7, pp. 47-49. La Orotava. Santa Cruz de Tenerife.
- HERNÁNDEZ GONZÁLEZ, M. (2001): "Labores canarias de piedra en América (las destiladeras y las acequias)", en *El Pajar. Cuadernos de Etnografía Canaria*, n° 9, pp. 134-137. La Orotava. Santa Cruz de Tenerife.
- HERNÁNDEZ MARTÍN, F.M. (2011): *Apuntes sobre el Patrimonio Etnográfico de Tenerife*. Asociación Cultural "Pinolere. Proyecto Cultural". La Orotava. Tenerife. «Cap. IV. El Patrimonio Hidráulico. Arquitecturas del Agua», pp. 72-121».
- IES ARUCAS DOMINGO RIVERO (2009): "Una ruta por el agua de Arucas. *Las Cantoneras*", Rev. N° 284 de *Bienmesabe.org* (consulta: 15 de noviembre de 2009). <http://www.bienmesabe.org/noticia.php?id=43431>
- LIRIA RODRÍGUEZ, J.A. (2003): *El agua en Gran Canaria*. Jóvenes Agricultores, Las Palmas de Gran Canaria.
- MARTÍN MARTÍN, V. (1991): *Agua y agricultura en Canarias: el Sur de Tenerife*. Editorial Bencho. Colección Tasufra n° 4. Las Palmas-Santa Cruz de Tenerife.
- MEDINA PÉNATE, E. (1999): *Adeyahamen. Debajo del Agua. Localización y análisis comparativo de las principales cantones de Telde*. Ayuntamiento de Telde.
- MORALES MATOS, G. y SANTANA SANTANA, A. (2005): *Islas Canarias. Territorio y Sociedad*. Colección Textos Universitarios. Anroart Ediciones. Las Palmas de Gran Canaria.
- PAIS PAIS, F.; PELLITERO LORENO, N. y ABREU DÍAZ, C.A. (2007): *Sistemas de aprovechamiento del agua entre los Benahoritas y su pervivencia en la época histórica*. Cuadernos CICOP para la divulgación del Patrimonio Cultural y Natural, n° 12. San Cristóbal de La Laguna. Tenerife.
- REYES AGUILAR, A. (1989): *Estrategias hidráulicas en la isla de La Gomera*. Museo Etnográfico-Cabildo de Tenerife-Cabildo de La Gomera. Santa Cruz de Tenerife.
- RODRÍGUEZ BRITO, W. (1995): *El agua en Canarias y el siglo XXI*. Cabildo Insular de Gran Canaria. Las Palmas de Gran Canaria.
- SABATÉ BEL, F. (1993): *Burgados, tomates, turistas y espacios protegidos. Usos tradicionales y transformaciones de un espacio litoral del sur de Tenerife...*, Servicio de Publicaciones de la Caja General de Ahorros de Canarias. Santa Cruz de Tenerife.

- SANTAMARTA CEREZAL, J.C.; RODRÍGUEZ J. (2008). *Singularidades de las obras hidráulicas para abastecimiento de agua potable en medios volcánicos. El caso del archipiélago Canario*. España. Congreso Internacional sobre Gestión y Tratamiento del Agua. Córdoba, Argentina.
- SANTAMARTA CEREZAL, J.C. (2009) *Singularidades sobre la construcción, planificación y gestión de las obras y recursos hídricos subterráneos en medios volcánicos. Estudio del caso en las Islas Canarias occidentales*. Tesis (Doctoral), E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos (UPM) [En línea]. Universidad Politécnica de Madrid 2010, [ref. de 15 Octubre 2010]. Disponible en Web: <http://oa.upm.es/3389/>
- SANTAMARTA CEREZAL, J.C. (2009). *La minería del agua en el archipiélago canario*. Sociedad Española para la Defensa del Patrimonio Geológico y Minero. De Re Metallica, 12 1-8.Madrid.
- SANTAMARTA CEREZAL, J.C. e ITZJAK, M. EVALON, D. (2010): *Forest hydrology for increasing water resources and run-off in semiarid zones. The case of the Canary islands and the semiarid zone of Israel*. 24th IUFRO Conference for Specialists in Air Pollution and Climate Change Effects on Forest Ecosystems: Adaptation of Forest Ecosystems to Air Pollution and Climate Change. Antalya. Turkey
- SANTANA, F. (1992) *Castellán Aquae (Atarjeas, cantoneras)*. IV Feria Iberoamericana de Artesanía. Cabildo de Gran Canaria.
- SUÁREZ MORENO, F (2005): “Estrategias y arquitecturas del agua en Gran Canaria”, en *Crónicas de Canarias*. Junta de Cronistas de Canarias. Las Palmas de Gran Canaria.
- SUÁREZ PÉREZ, A. (2012): “Cantoneras y medidores del agua en Canarias. Patrimonio en peligro”, en *Diario de Avisos*, Santa Cruz de Tenerife, 18 de marzo de 2012 y en *Patrimonio Industrial Arquitectónico*, 23 de marzo de 2012, en línea:
<<http://patrindustrialarquitectonico.blogspot.com.es/2012/03/cantoneras-y-medidores-del-agua-en.html>

Binomio Agua y Energía. Aprovechamientos hidroeléctricos en medios insulares

Juan Carlos Santamarta Cereza
Francisco Suárez Moreno
Amanhuy Suárez Pérez

1. Introducción a los recursos energéticos de Canarias

El uso de la energía en Canarias ha desarrollado unas etapas singulares. La primera es la etapa aborigen con el uso de la biomasa que el monte le suministraba, posteriormente tras la conquista se evolucionó hacia la energía hidráulica desde el punto de vista mecánico, como los molinos para amasar gofio o los ingenios hidráulicos del azúcar.

La energía eólica se introdujo en Canarias inicialmente como sistemas de elevación de aguas que fueron quedando en desuso al entrar en juego los combustibles fósiles, como el petróleo, que ha perdurado hasta nuestros días.

El primer recurso energético que suministró electricidad propiamente dicha en las islas Canarias, fue el agua, entre finales del siglo XIX y principios del XX la electricidad llega a Canarias a través de las primeras hidroeléctricas con miniturbinas *Pelton* acopladas a generadores movidas por saltos de agua en las islas de La Palma y Tenerife, algunos de los cuales todavía se pueden contemplar por la geografía insular. Es curioso que los nuevos macro proyectos energéticos que plantea Canarias es una

vuelta a estos orígenes con la central hidroeólica en la isla de El Hierro y los futuros proyectos de centrales reversibles de Gran Canaria, Tenerife y La Palma.

En épocas recientes Canarias hizo una apuesta firme con las energías renovables, centrándose en la energía solar y la eólica, por unas cuestiones, que no son de carácter técnico, no se han explotado convenientemente como un recurso que canalice la mayoría de la demanda energética del archipiélago. Se pueden instalar por todo el territorio innumerables instalaciones de EERR (solar y eólica) pero dependen del sol y el viento que haya en cada momento y el sistema no puede asimilar la energía, cuando se produce más recurso del necesario y, por otra parte, en muchas ocasiones no puede generar energía de acuerdo con la demanda.

Hay varios vectores que pueden canalizar el futuro energético de Canarias. Uno de los más importantes es el que corresponde a las comentadas energías solar y eólica, las centrales reversibles y las posibilidades que pueden generar la optimización y uso de la energía geotérmica de baja entalpía. También hay que tener presente que la producción de energía convencional, tal y como la conocemos mediante combustibles fósiles, siendo realistas, es muy difícil que desaparezca en un futuro próximo por lo que el escenario más razonable, es posible que sea un “matrimonio eléctrico” entre las renovables y las generadas por combustibles fósiles ya que a priori alguien debe dar una *energía base* para el mantenimiento del sistema.

El usuario final de la energía dispone de un papel primordial en el uso de la misma, ya que la gran mayoría de las edificaciones construidas en Canarias suplen su pésimo diseño bioclimático con enormes consumos energéticos. Evidentemente toda planificación energética pasa por un uso eficiente de la energía producida y en eso la arquitectura bioclimática tiene un papel fundamental, porque en pleno siglo XXI, un sistema insular aislado como el que presenta Canarias no sólo se debe conformar con la eficacia en la satisfacción de la demanda del suministro eléctrico (diversificación de fuentes, renovables y no renovables) sino que, tiene que buscar la eficiencia y la sostenibilidad en el mismo. Todo eso comienza con el diseño y la arquitectura eficiente en las edificaciones e instalaciones buscando el mayor confort con el mínimo gasto energético.

Finalmente para hablar de todas las posibilidades existentes, incluso la energía nuclear, a modo de anécdota, aunque nunca se ha planteado seriamente las centrales nucleares en Canarias, se puede comentar que hubo un proyecto para la realización de una instalación nuclear para suplir energéticamente a una planta de desalación de aguas en la isla del Hierro.

2. Binomio agua y energía en medios insulares

Los recursos hídricos en un sistema insular están vinculados a la energía en dos sentidos; el primero es que, como norma general y salvo excepciones, el ciclo del agua está vinculado al consumo energético, para bombear el recurso hídrico desde los pozos es necesario disponer de equipos que para elevar el recurso y esto genera un gasto económico nada despreciable. En algunos casos como el de las galerías o minas de agua, estas se disponen en zonas con una altitud considerable y, extraen el agua del acuífero por gravedad en la mayoría de los casos, gracias a esto no consumen energía, caso aparte son los pozos-galería (pozo en cuyo fondo parte una galería hacia el acuífero situado en la dorsal) en este caso se hace necesario un equipo de elevación de aguas, salvo que sea de tipo artesiano, como por ejemplo, el *pozo-galería* Los Padrones situado en la isla de El Hierro. Se puede considerar el único pozo artesiano de Canarias, el cual, gracias a la sobreelevación que producen los diques geológicos (cierres del acuífero), hay un salto considerable de agua (estimado en 73 m), entre galería y dique, que hace disponer de un potencial suficiente para extraer el agua sin consumo energético.

El recurso extraído por estos medios se suministra a los depósitos reguladores, en zonas de altitud elevada mediante unas conducciones principales, por gravedad en la mayoría de los casos, el agua se suministra desde estos dispositivos a los usuarios finales.

Otra parte importante del consumo de energía por el ciclo integral del agua lo acaparan los procesos de depuración de aguas, en este sentido dentro de una EDAR, existe una serie de equipos cuyo funcionamiento requiere de un consumo importante. Caso aparte serían los métodos no convencionales de depuración como el lagunaje, biodiscos, filtros verdes, etc., que no requieren tanta demanda energética, si bien no pueden llegar a las dimensiones y caudales necesarios a trata que pueden suplir los métodos convencionales diseñados para grandes ciudades. Los métodos no convencionales pueden ser una buena opción en pequeñas localizaciones rurales o núcleos de población; por ejemplo en Carrión de los Céspedes, provincia de Sevilla, existe una gran instalación de este tipo con unos resultados esperanzadores.

Los saltos de aguas negras, procedentes de EDARS de núcleos urbanos situados en cotas elevadas, también podría ser un recurso energético que todavía no está explotado en Canarias aunque existen algunos estudios al respecto en la EDAR de Santa Cruz de Tenerife, eso sí habría que contemplar unos equipos resistentes a la corrosión producida por esas aguas.

Por último en relación a la desalación de agua de mar, existe abundante literatura técnica sobre el consumo energético de este tipo de instalaciones, si bien, se ha reducido el consumo de manera importante a día de hoy sigue siendo ciertamente elevado y muy dispar en función del tipo de instalación a estudiar, tamaño e isla. Influye también, el factor de economía de escala a mayor instalación menores costes por este motivo es mucho más caro desalar en las islas no capitalinas debido a que son, en general instalaciones de menores dimensiones. En esta cuestión también destacan las nuevas técnicas de recuperación energética en plantas de ósmosis inversa (intercambiadores de presión), con consumos específicos en el rango de 2,0 a 3,0 kWh/m³.

En las islas Canarias existen numerosos ejemplos donde se puede constatar la relación profunda entre el ciclo del agua y la energía por ejemplo en la isla de Lanzarote, más del 27% de la energía que se consume se destina al ciclo del agua, y de ese porcentaje, el 75% se destina a desalar agua de mar (Peñate B, 2004).

En otro sentido, el agua, puede ser considerado un recurso energético al almacenarse y turbinarse, incluso al instalarse pequeños equipos de aprovechamiento hidroeléctrico (mini hidráulica de menos de 10 MW de potencia) sobre todo los vinculados a las galerías de agua, aprovechando la altitud a las que están proyectadas, por ejemplo en Tenerife la galería de aguas de Vergara dispone de estas centrales minihidráulicas de aprovechamiento energético.



Figura 12.1; Cámara de carga de la central “el mulato” en la isla de La Palma el agua procede de los nacientes Marcos y Cordero (Santamarta, 2010).

La demanda de recursos hídricos son cada vez mayores, por lo tanto, y siguiendo las premisas comentadas en el presente documento también aumentarán las demandas energéticas, que podrán ser suplidas en algunos casos por las energías renovables (eólica sobre todo) o bien, por los futuros proyectos de centrales reversibles, estos proyectos en algunos unos casos funcionarán como productores de energía; en otros como baterías y reguladores del sistema.

3. Suministro energético en medios insulares

Es evidente que; el aislamiento y el tamaño de los sistemas eléctricos insulares y extra peninsulares de Canarias, Baleares Ceuta y Melilla refleja unos factores diferenciales respecto al sistema eléctrico peninsular.

Canarias consume aproximadamente unos 9.200 GWh anuales y su potencia eléctrica instalada es de 2.583,3 MW. Sus sistemas de producción (sin contar las renovables) se distribuyen según la siguiente tabla;

Tabla 12.1 Capacidad eléctrica de Canarias (sin renovables).(Endesa Generación, 2008)

TIPO	MW	%	Nº DE GRUPOS
Vapor	713,2	27,6%	13
Diesel	546,9	21,2%	58
Ciclo Combinado	688,1	26,6%	3
Gas	606,0	23,5%	19
Hidráulica	0,8	0,0%	1
Grupos Electrógenos	28,5	1,1%	3

Canarias es un sistema aislado esto provoca ciertas singularidades en el suministro eléctrico que en gran parte está suplido por los combustibles fósiles. Este sistema aislado en general, está saturado en las islas y presenta ciertos problemas que se pueden resumir en:

- Incremento exponencial de la demanda eléctrica.
- Atomización de los centros de producción (varios en cada isla).
- Dependencia elevada de combustibles fósiles.

- Dificultades administrativas y ambientales para el desarrollo de nuevas líneas eléctricas y proyectos energéticos.
- Complejidad para la ubicación de nuevas centrales eléctricas.
- Complejidad y alta burocracia para la autorización de nuevos equipos de generación.
- Presión, para la integración en el sistema de generación, de las energías renovables.
- No existe interconexión entre los sistemas eléctricos de las islas.
- Los costes de construcción y explotación son mayores.

Otro gran problema de los sistemas aislados insulares es la vulnerabilidad que presente la generación eléctrica ante situaciones catastróficas que se dan a menudo en el archipiélago, como por ejemplo;

- Huracanes (tormenta Delta en el 2005).
- Lluvias torrenciales (tormenta en Tenerife Marzo 2002).
- Calima sahariana (polvo en suspensión).
- Otros menos frecuentes como erupciones volcánicas, tempestades del mar que provoca fuerte oleaje, cabe destacar el ejemplo de la central eléctrica de Llanos Blancos en la isla de El Hierro, la cual por un fuerte oleaje, tuvo un “0 eléctrico” en toda la isla.
- Dificultad en la regulación y gestión de la producción eléctrica.

En el sentido de la gestión eléctrica, las redes de transporte deben ser reguladas en base a que la energía se produce y se consume al mismo tiempo, por lo tanto, debe haber un equilibrio entre el consumo y la producción eléctrica de manera simultánea. También se hace necesaria una regulación de los sistemas y esto sólo puede ser llevado a cabo por elementos productores de energía flexibles, que a su vez deben tener elevado rendimiento para contribuir a la eficiencia del sistema, en este sentido podemos clasificar los sistemas productores de energía en los comentados flexibles gestionables y rígidos no gestionables.

Los sistemas rígidos son aquellos que no se pueden modular, en este grupo lo formarían; las centrales nucleares, las térmicas, la energía eólica y la solar (estas dos últimas dependen de condiciones ambientales). Por otro lado están los sistemas con cierta flexibilidad, estos son; las turbinas de gas y los motores diesel. La mayor flexibilidad, bajo coste y alto rendimiento, se obtiene en las centrales hidroeléctricas.



Figura 12.2; Central eléctrica diesel en la isla de El Hierro. (Santamarta JC, 2008)

Todo sistema eléctrico tiene una energía de base, que por ejemplo en la Península Ibérica, es suministrada por la energía nuclear, en el caso de Canarias esta energía base es suministrada por las energías procedentes del vapor y el diesel, posteriormente están las renovables y por último las hidráulicas (en un futuro en Canarias) con las cuales se podría regular en cierta manera el sistema eléctrico insular en determinadas islas que posibiliten en desarrollo de estas centrales de energías renovables.

Parece evidente que la tendencia actual para mejorar la eficiencia del suministro energético en Canarias es una apuesta firme en los sistemas de bombeo hidráulico, complementados por la producción de energías renovables, el progresivo desmantelamiento de las centrales térmicas convencionales y la instalación de centrales de ciclos combinados y turbinas de gas.

Las nuevas centrales hidroeléctricas aportarían al sistema los siguientes beneficios;

- **Alta capacidad de almacenamiento de energía** con grupos generadores compuesto por máquinas robustas y fiables que necesitan pocos sistemas o equipos auxiliares para su operación.
- **Adecuado complemento a la modulación de las puntas** siendo realizado en las horas solares principalmente con la fotovoltaica y en las horas nocturnas con la hidráulica.
- **Optimización de las energías renovables no gestionables** (eólica más fotovoltaica), al permitir verter al sistema sus máximos recursos siendo empleados estos en el bombeo en caso de excedentes.
- **Optimización de la térmica convencional** al poder generar un número mayor de horas en sus valores de máximo rendimiento (tanto de consumo como medioambiental), siendo empleada su exceso de energía en el bombeo.
- **Optimización de los costes de explotación del sistema**, sin riesgo alguno ante transitorios, al suplir a las turbinas de gas convencionales en la generación de las horas punta.
- **Mejora de la Calidad de Servicio** al optimizar los planes de deslastre mientras funciona en forma bombeo al permitir su inmediata desconexión
- **Alta capacidad de respuesta** (en todas las formas de regulación), Acoplamiento desde parada en 3-5 minutos; subida a plena carga en menos de 2 minutos y actuación inmediata ante cualquier transitorio o imprevisto provocado ya sea por los grupos de régimen especial u ordinario.

Además medioambientalmente este tipo de centrales aportan unas externalidades y ventajas importantes como son;

- Es un uso no consuntivo del agua.
 - Si se sobredimensionan los embalses se puede utilizar ese recurso para otros menesteres (la hidroeléctrica en el Hierro funciona en este sentido) como por ejemplo; la lucha anti incendios forestales, el uso agrícola o incluso urbano en caso de emergencias.
- No produce emisiones ni contaminaciones de ningún tipo.
 - El turbinado es una energía limpia y fría.

- Regula las aportaciones de los barrancos y lamina las avenidas por lluvias torrenciales mediante los embalses.
 - Permite la utilización conjunta de sus embalses.
 - Consumo energético nulo.
 - Los embalses permiten crear nuevos hábitats para las aves
 - Explotación y mantenimientos económicos, no necesitan mucho personal.
 - Permite la utilización lúdica de los embalses.
- Como ejemplo la ruta de las presas en Gran Canaria.

Además en relación a los inconvenientes que se pueden dar a la hora de la construcción de estas instalaciones, a diferencia de las obras proyectadas en la península Ibérica, en el caso de Canarias no existe afección a la fauna y no han tenido que desplazarse poblaciones enteras a la hora de construir el embalse; tampoco en los cauces de barranco hay tránsito de especies piscícolas, al no tener flujo de agua los cauces, si bien es cierto que, el impacto paisajístico es mayor y en relación a la producción de sedimentos en los embalses (cuando estén asociados a un barranco) por la colocación de un muro transversal al cauce, en Canarias se ven más afectados por los aterramientos y la acumulación de sedimentos, influyendo también la propia orografía de las Islas y su régimen de lluvias.

4. Estrategias históricas para aprovechar la energía hidráulica

Los fuertes desniveles que presentan las Islas Canarias y la existencia de cursos de agua casi continuos por las acequias de las heredades, a excepción de las dos islas casi llanas y muy secas de la parte oriental (Lanzarote y Fuerteventura), determinó que desde los primeros decenios de la colonización europea se aprovechara el recurso energético hidráulico antiguo para mover *molinos harineros*, *molinos de ingenios azucareros*, *batanes* y *serrerías*; pero sólo quedan vestigios como bienes patrimoniales de los molinos harineros o molinos de gofio en un conjunto que aún no ha sido evaluado a excepción de la isla de Gran Canaria cuyas cartas etnográficas suman un total cercano a las 188 unidades (Díaz R., 1988), le siguen en importancia la isla de Tenerife que cuenta con el conjunto patrimonial local más importante de

la región, los 13 molinos de La Orotava alineados por la misma acequia que cruza la villa (actualmente solo se conservan 10) y ya en menor número están las islas de La Gomera y La Palma aunque en esta isla se encuentra un valioso conjunto de 13 molinos de agua en el Barranco del Río (Santa Cruz de La Palma) conocido como *El Río de Los Molinos* (Lorenzo T., 2010).

Entre finales del siglo XIX y principios del XX la electricidad llega a Canarias a través de las primeras hidroeléctricas con mini turbinas *Pelton* acopladas a generadores movidas por saltos de agua en las islas de La Palma y Tenerife, algunos de los cuales subsisten como uno de los más apreciados bienes patrimoniales industriales hidráulicos. La tecnología de estos artilugios procede tanto de la medieval preexistente en la Península Ibérica (molinos de agua) aunque desarrollada de acuerdo a las necesidades y especificidades naturales de cada isla como la importada de las zonas europeas de mayor desarrollo tecnológico de la Segunda Revolución Industrial por la posición geoestratégica y económica del Archipiélago, en cuanto a la estrategia de las primeras hidroeléctricas.

4.1. Molinos de agua

El aprovechamiento de la energía hidráulica de estos ingenios es el siguiente en casi todos los de la región: con el agua acumulada en un enorme cubo, casi siempre cilíndrico (los de La Orotava presentan estructuras en planta rectangular), en cuya fondo, a través de un bocín, se suelta el agua a presión sobre una rueda horizontal o rodezno, situada en una especie de sótano. Esta rueda a través de su eje vertical transmite la fuerza energética a las muelas del molino situadas en una habitación superior, desde donde con una llave se regula la cantidad de agua a presión y con otra la textura de la molienda. Algunos molinos presentan dos bocines para dos maquinarias. El material de construcción empleado en estos molinos es variable por islas y zonas. Así algunos de los más antiguos en zonas húmedas, caso del norte de Tenerife, se hicieron con madera (canal, cubo y maquinaria, ver acuarela anexa de un molino de La Orotava, años 1700) a excepción de la obra de fábrica de la sala hecha con mampostería ordinaria. En zonas con canteras próximas se empleó mucho cantos y sillares y en otras la obra de mampostería ordinaria y siempre en madera con algunas piezas metálicas el artilugio de captación y transmisión de la energía mecánica.



Figura 12.3; Molino impulsado por agua en Vilaflor, Tenerife. (Santamarta JC, 2009)

El rendimiento de los molinos de agua, además de disponer de una fuente energética sin coste alguno, venía a ser muy superior a los de sangre. Una persona con un molinillo de mano sólo podía moler, en una hora, unos 4 kg de trigo —grano de fácil molturación— frente a los 100 kg de un molino de agua con sólo 3 CV de potencia, y más aún podían triturar otros que desarrollaban hasta 20 CV (Suárez M, 2001).

Entre los molinos de agua rehabilitados y visitables tenemos en Gran Canaria al Molino del Conde, en Firgas; El Molino de La Ladera, en La Aldea y el Molino de Antónico Bordón en Ingenio. Más valor tienen los que aún muelen grano, verdaderos museos vivos como los dos que subsisten en funcionamiento de La Orotava: el Molino de Chano (conocido como el *Molino de Arriba*) y La Máquina (conocido como el *Molino de Abajo*). Otro conjunto de molturación que marca jalón en la tecnología canaria del agua es el Molino del Conde, en Telde, con singulares mecanismos de desmultiplicación. Casi todos están protegidos por los catálogos municipales y algunos con la categoría superior de Bien de Interés Cultural por la administración autonómica. Este conjunto canario de bienes patrimoniales es de los mejor estudiados, lo que constan en una prolija pero muy desperdigada literatura etnográfica.



Figura 12.4: Dibujo a lápiz, tinta y acuarela del Molino de la Sierra (cuba y canal de tablones) y Ermita de Santa Catalina (La Orotava, Tenerife). Anónimo de 1700. AHP SCT. Archivo Zarate Cologan

4.2. Hidroeléctricas históricas

En las islas más húmedas y montañosas, como La Palma y Tenerife, se han aprovechado los desniveles por lo que discurrían las acequias para generar saltos de agua con el fin de aprovechar su energía en pequeña centrales hidroeléctricas. Las primeras empiezan a instalarse a finales del siglo XIX y las siguientes décadas del siglo del XX, tales como las de El Río (Santa Cruz de La Palma), Tazacorte, Argual y El Mulato en La Palma; las dos de La Orotava y la Barranco de Badajoz; en Tenerife. De estas siete históricas mini centrales hidroeléctricas solo queda una en funcionamiento y completamente mejorada, la del Mulato (La Palma), dos en el silencio de la espera para su protección y reutilización como bienes patrimoniales hidráulicos: la “Hidro” de Güímar (Tenerife) y la Central de El Río (La Palma) los edificios y bienes de equipo las que aún quedan algunas como uno de los más preciados bienes patrimoniales industriales del agua. Todas coinciden en su origen con un mismo sistema

y tecnología hidroeléctrica: salto en altura a través de una tubería para mover una o dos microturbinas de eje horizontal tipo *Pelton* acoplado a un generador de electricidad. Además en tiempos más recientes se instaló otra en Tenerife (La Guancha) y se redactan nuevos proyectos para Gran Canaria, Tenerife, El Hierro y La Palma.

4.2.1. Hidroeléctricas históricas en La Palma

La primera central hidroeléctrica canaria se construye entre 1892 y 1893 en el barranco de El Río, en el municipio de Santa Cruz de La Palma, por parte de una sociedad creada al efecto con el nombre de *Electrón*. Constaba de los siguientes bienes de equipo: una tubería de acero con costuras cocidas con remaches, tendida ladera abajo casi en vertical de 110 metros que llega a una sala de máquinas, donde se hallaba una turbina *Pelton* de 50 CV de potencia para accionar a un generador eléctrico de 50 kilovoltios-amperios (KVA) y artilugios anexos internos y externos (red de transporte de la electricidad) para el alumbrado de la capital, que se prueba el 28 de diciembre de 1893 y se inaugura para la noche vieja de aquel año, con gran expectación y conformando todo un hito en la historia de Canarias y en la su tecnología, más con una fuerza limpia y barata como la del agua. Esta centra se mejora en 1916 con una ampliación del sistema tras la instalación de una turbina más, tipo *Pelton* de 75 CV y un generador de 75 KVA, para cubrir una demanda de luz cada vez mayor. Y cumplió durante 56 años (1893-1949) con un servicio a la capital hasta que nuevos proyectos con motores térmicos la sustituyeron (Martín *et al*, 2000).

Esta primera fábrica de luz de Canarias, cuyas instalaciones aún subsisten es un extraordinario bien patrimonial sobre el que alumnado y profesorado del *IES Virgen de las Nieves* ha realizado propuestas de conservación desde hace años, la más reciente de hace poco más de un año en el marco de un programa de educación patrimonial de la Dirección General de Promoción Educativa en el que se diseñó un plan para rehabilitar las emblemáticas instalaciones. A tal efecto, en 2011, se ha suscrito un convenio entre el ayuntamiento de Santa Cruz de La Palma y la empresa actual de estas instalaciones, ENDESA, para ubicar en su edificio e instalaciones un museo único en Canarias dedicado a la historia de la electricidad complementado con el del aprovechamiento de la energía hidráulica por la red de molinos harineros de agua ubicados a pocos metros de esta central.

En otros puntos de esta isla la red eléctrica se fue extendiendo a principios del siglo XX con motores térmicos fijos de marcas inglesas como impulsores de generadores. En aquel momento estos motores, idénticos a los estudiados para la succión elevación de aguas de pozos representaban una energía barata e independiente

pero sin ningún punto de comparación con la energía limpia de los saltos de agua. A tal efecto se estudia por parte de los propietarios de las aguas de la Caldera (Argual-Tazacorte) aprovechar sus desniveles para una nueva hidroeléctrica, esta vez aprovechando los avances tecnológicos de la casa alemana Siemens. Así el 2 de mayo de 1933 entra en funcionamiento la Central Hidráulica de Tazacorte con una turbina *Pelton* de 440 CV y un alternador de 320 KVA y poco después, el 29 de julio lo hace la tercera, la Central Hidráulica de Argual con una turbina *Pelton* de 145 CV y alternador de 105 KVA.

Cuando las primeras minicentrales hidroeléctricas quedaron totalmente inactivas surge otro gran proyecto en el norte de la Isla, en el municipio de San Andrés y Sauces, en el bosque de Los Tilos: la *Central Hidráulica de El Mulato*, que entra en funcionamiento con un salto de agua de 400 m de altura para accionar una turbina *Pelton* de 1.200 CV acoplada a un alternador de 1.000 KVA, en octubre de 1955, por iniciativa privada de Riegos y Fuerzas de La Palma. Tras los diversos cambios de propiedad de las distintas fábricas de electricidad (hidroeléctricas y motores fijos térmicos) que tienen lugar en La Palma y en toda Canarias que pasan todas primero a la sección de multinacional americana UNELCO y de esta más recientemente a ENDESA, la central de El Mulato sigue produciendo electricidad con la energía hidráulica con el objetivo inmediato de ampliación nada menos que a una potencia de 5 Megavatios; con respecto a las unidades de potencia empleadas para las primeras turbinas, unos 6.799 CV, 5 veces más potente que el anterior y 100, aproximadamente, que las primeras de la Central de El Río.

4.2.2. Hidroeléctricas históricas en Tenerife

Los caudales de agua y desniveles orográficos de Tenerife, tan acusados como los de La Palma, también fueron aprovechados para la industria energética hidráulica; primero y hasta tiempos actuales con los estudiados molinos de agua e incluso con una serrería hidráulicas en La Orotava desde principios del siglo XVI hasta el siglo XVIII, y, luego, para la producción eléctrica con los adelantos de la Segunda Revolución Industrial. Por tanto, la tecnología hidroeléctrica llegó a esta isla muy tempranamente, en La Orotava, un año después de ver la luz eléctrica en Santa Cruz de La Palma, se constituyó en la villa de La Orotava la Sociedad Eléctrica La Orotava que puso de inmediato en funcionamiento, hacia 1894, en la Hacienda Perdida, una minicentral hidroeléctrica con una pequeña turbina *Pelton* de 75 CV para accionar un generador similar al instalado en La Palma, que más tarde, a partir de 1913, comenzó suministrar energía al municipio vecino de Puerto de la Cruz.

En la actualidad, se sigue denominando al lugar con el topónimo popular de “La Planta Vieja” frente al de “La Planta”, en clara referencia a la más moderna que fue acuñado años después. En los años treinta, esta central había quedado obsoleta por lo que comenzaron las obras de una nueva central, en la zona de La Abejera, próxima al popular y artesano barrio de la Villa de Arriba de San Juan del Farrobo. Esta fue puesta en funcionamiento en 1934 por iniciativa del alcalde republicano, Manuel Hernández, con una maquinaria de mayor capacidad de producción que llevaba una turbina de 530 CV, como servicio de fluido eléctrico de carácter municipal para todo el valle.

La siguiente hidroeléctrica de Tenerife se instala en el municipio de Güímar. Fue concebida en 1920 por el político local Tomás Cruz García y se hizo realidad con su inauguración en abril de 1929. Para este proyecto aprovechó la fuerza motriz de las aguas de la comunidad “Río y Badajoz” a través de un salto entubado que baja hasta la zona del Pico (entre los Barrancos del Río y Badajoz), donde se construyó la central, que suministró electricidad primero al casco de Güímar y años más tarde al vecino pueblo de Arafo. El proyecto del salto fue elaborado por el ingeniero de Caminos Rafael de Villa y Calzadilla; tenía 200 m de desnivel y aprovechaba un caudal de agua de 60 litros por segundo; la turbina Pelton, desarrollaba 1.000 revoluciones por minuto y generaba una potencia inicial de 151 CV. El material hidráulico y eléctrico, así como su montaje, correspondió mediante contrato, a la casa Siemens Schukert. En cuanto al edificio de la central, fue construido por los ingenieros Juan Haesy y Carlos Moenck, y aún se conserva al borde del Barranco del Río (Rodríguez D., 2009).

La *Hidro*, como popularmente se la conoce en Güímar, dejó de funcionar poco después de que en 1965 entrase en funcionamiento la central térmica de Las Caletillas, en la costa de Candelaria. Su entidad propietaria “Sociedad Hidroeléctrica de Güímar”, constituida en 1927, se integró en UNELCO hacia 1972. El edificio consta de dos cuerpos ortogonales adosados uno de dos plantas donde se conserva parte de los bienes de equipo tales como bornes de anclaje del tendido eléctrico que abastecía a las poblaciones del valle, maquinaria, conducciones de agua, tanquillas o aforímetros, etc. En 2007 el Gobierno de Canarias declaró a este bien patrimonial como *Bien de Interés Cultural* con la categoría de *Sitio Histórico*. La única hidroeléctrica que funciona actualmente, sin valor patrimonial por ser moderna, es la del salto de agua de 575 m de desnivel que sale de la galería de Vergara en La Guancha con una capacidad de producción de su alternador de 463 kW. En este último caso, actualmente se transporta un caudal continuo de 75 litros/segundo que desciende desde los 1.315 metros de altitud hasta los 740 metros, salto que se aprovecha con la central hidroeléctrica.



Figura 12.5; Cámara de carga de la central mini hidráulica en la galería Vergara, Tenerife. (Santamarta JC, 2009)

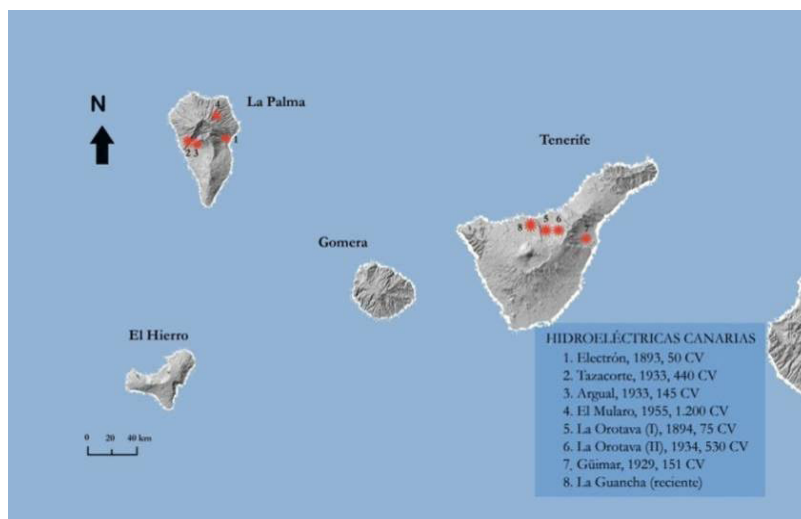


Figura 12.6; Centrales hidroeléctricas en Canarias. (Suárez A.)

4.3. Aeromotores para elevar agua de pozos

Unos eran de importación y otros contruidos por maestros de los talleres insulares. Se caracterizaban por estar contruidos con materiales de alta calidad; una estructura metálica galvanizada, un sistema de transmisión conformado por engranajes de desmultiplicación en piezas fundidas y con un par de motor muy bajo que permitía aprovechar los vientos más suaves. Aún quedan en pie estos molinos, joyas para la Arqueología Industrial, en Fuerteventura, sureste y oeste de Gran Canaria.

En Gran Canaria se desarrolló una tecnología hidráulica propia, sobre todo en los talleres de ensamblaje y fundición de Las Palmas de Gran Canaria, donde se diseñaron y patentaron aeromotores y bombas de pistón (polea, cabezal, varillas, émbolos...). Un ejemplo lo tenemos en el taller de fundición situado en la calle Travieso de Manuel Santana con el célebre aeromotor *Canario*, de los que quedan algunas unidades visibles desde la autopista del Sur, en Carrizal y Maspalomas. Pero el mayor número de estos artilugios para sacar agua de pozos fueron los importados de Chicago, Estados Unidos, denominados molinos americanos. En las islas orientales pudo haberse instalado un total aproximado de 663 aeromotores. A los que la tecnología popular buscó soluciones técnicas diversas (Suarez M., 1994).



Figura 12.7; Molino de construcción local en Lanzarote. (Santamarta JC, 2011)

4.4. Máquinas de vapor y motores térmicos

Las primeras máquinas térmicas acopladas a bombas para extraer agua de los pozos canarios fueron las máquinas de vapor inglesas. Luego, según avanza el siglo XX comienza la importación masiva los motores de gas pobre y los prediésel o de bulbo incandescente, pronto sustituidos por los diesel (*Ruston, Petter, Tangye*, etc.) tanto unos como otros para accionar bombas de pistón y de rosario en pozos cada vez más profundos, que sustituyen a los aeromotores; así como se emplearon en las galerías de agua para la extracción de gases. Hacia 1977, solo en Gran Canaria aún elevaban agua 2.192 motores con una potencia total de 81.566 CV (Suárez M., 1994). Pero la llegada del fluido eléctrico a todos los puntos de nuestra geografía y las nuevas tecnologías hidráulicas, determinaron la sustitución de los mencionados motores térmicos y bombas de pistón por las muy operativas y baratas bombas eléctricas, en el último cuarto del siglo XX, momento en que el rico acuífero insular, sobreexplotado después de los años treinta, no pudo resistir aquel incesante bombeo de los motores. No obstante aún se conservan interesantes salas de máquinas en pozos del sur de Tenerife, norte de Gran Canaria y Fuerteventura, algunas constituyen auténticos museos vivos del patrimonio industrial-hidráulico.

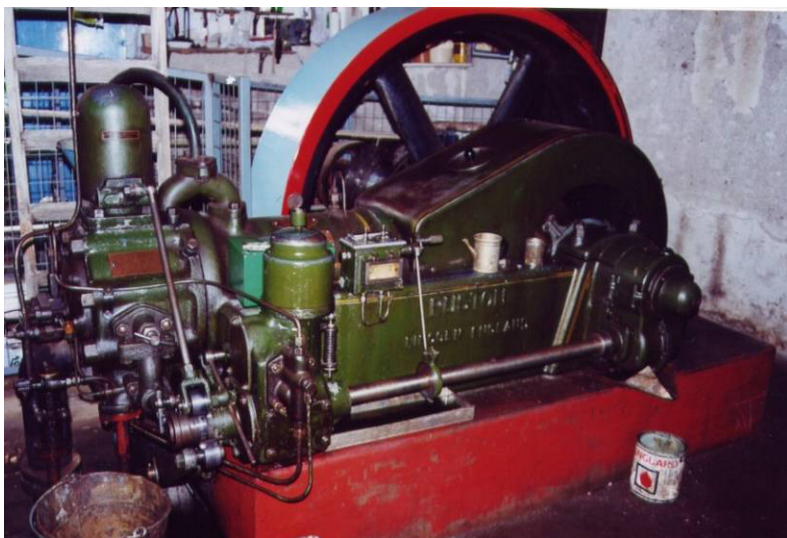


Figura 12.8; Motor inglés Ruston de 30 CV para elevar agua con bombas de pistón en un pozo de Valsequillo (Gran Canaria). (Suárez F, 2002).

4.5. Bombas hidráulicas para elevar agua de pozos

Ni molinos ni motores podían por sí solos extraer el agua de los pozos o elevarlas desde los tomaderos a red hidráulica de la agricultura. El primer artilugio de bombeo aplicado a bomba de pistón fue el malacate de la Noria de Jinámar (Telde) de mitad del siglo XIX, hoy Bien de Interés Cultural y convertido en museo del agua (Suárez M., 2001).

Las primeras máquinas de vapor y motores de gas accionaban distintos tipos de bombas (de rosario, centrífugas, de pistón, etc.). Después de la Primera Guerra Mundial, al comienzo de la perforación masiva de pozos y con poca profundidad, se impone por el bajo coste y facilidad de instalación-mantenimiento las bombas centrífugas de importación; pero cuando el nivel freático por sobreexplotación comenzó a descender, después de 1940, y a profundizarse más los pozos, hubo que sustituir la bomba centrífuga por el viejo sistema de bomba de pistón ya que la profundidad de los pozos obligaba un alejamiento tanto de la centrífuga del motor como de ésta del nivel piezométrico del agua del pozo, al no poder, por simple ley física el tubo de aspiración sobrepasar los 6-7 metros.



Figura 12.9; Andamiaje de bancazas, varillas, guías, etc. para un sistema de bombeo de pistones en tres cuerpos. (Pozo del Pino. Arucas).

La importancia que tuvo en Canarias la bomba de pistón es que generó una tecnología propia en los talleres locales de fundición, para un complejo sistema de cabezales, varillas, andamios, etc. En 1946, casi un 70% de las bombas hidráulicas de los pozos de las Islas Orientales, eran de este tipo, casi todas fabricadas en la ciudad de Las

Palmas de Gran Canaria (Suarez M., 1994). A partir de 1950 comienza la tímida electrificación de los pozos donde bien por la red pública o privada o en su caso desde un generador accionado por el motor del pozo, comienza a emplearse las primeras bombas eléctricas sumergibles, las que con el tiempo terminan por imponerse con un considerable ahorro de dinero.

4.6. Otros sistemas de elevación de aguas; Roldanas, bomberos y calabazos

El primer sistema de elevación de agua de pozos, desde los primeros años de la colonización europea fue con una sogá, roldana de madera y cubo. Luego, ya en el siglo XIX, se importaron de Europa y de Estados Unidos las bombas manuales aspirantes impelentes empleadas desde tiempos atrás en los achiques del agua de mar en los barcos, e incluso se diseñaron en los pozos con aeromotores un acoplamiento de una palanca de madera en el brocal para tirar de la bomba del molino cuando este no molía por falta de vientos.

El *bombero* es un artilugio de madera y sogas agua de mar para las salinas también necesitó sistemas de bombeo igual que los de pozos primero, a principios del siglo XIX, con molinos de construcción local y más tarde con pequeños motores térmicos fijos con bombas centrífugas; aunque, antes, desde los siglos XVI-XVIII se empleó, para enviar el agua salada desde los estanques primarios de recepción, los *cocederos*, hasta los tajos cristalizadores que se hallaban en un nivel superior, un artilugio denominado el *bombero*. Éste se compone de un recipiente de madera, sostenido con sogas en un soporte en forma de trípode; y se situaba al borde del cocedero y con trabajoso empuje manual, en continuo balanceo, se pasaba el agua de un nivel inferior al siguiente (González N., 1996). Es un sistema algo parecido a los bombeos manuales de la cultura mesopotámica o al *shadoff* empleado en las orillas del río Nilo para elevar el agua desde el mismo o sus acequias hasta planos superiores.

El *calabazo* es un sistema muy sencillo que procedente de Madeira se empleó en La Palma y Tenerife para elevar agua de acequia a un nivel superior por impulso manual con un cuenco de calabaza seca. Se generalizó en el Valle de Aridane (La Palma) donde se han realizado interesantes estudios etnohistóricos (Hernández P., 2010). Cada calabazo está compuesto por un palo en cuyo extremo se encuentra asido un recipiente, que en un principio era una calabaza seca sustituida luego por un cono hueco de material metálico de piezas soldadas, para tomar el agua y elevarla.

Este sistema surgió por la necesidad de salvar desniveles para llevar el agua desde el fondo del barranco a terrazas superiores y posibilitar el cultivo. A veces el agua elevada era de propiedad ajena a quien la tomaba y requería acuerdos de concesión lo que luego generó ciertos derechos adquiridos en el plano jurídico consuetudinario, para lo que incluso se realizaron pequeñas obras de fábrica en los puntos de elevación donde se recogía y se distribuía por todo el riego de la finca. Generó especialistas en esta faena, los *calabaceros* que podían elevar por este sistema de 16.000 a 18.000 litros por hora, en jornada laboral de hasta nueve horas. Tras su desuso hoy se ha convertido en un juego/deporte insular en La Palma (Castro N., 2007).



Figura 12.10; Calabaceros en plena faena de elevación de aguas. Los Llanos de Aridane, La Palma (María Victoria Hernández Pérez)

4.7. Bombeo mecánico desde tomaderos

Se trata de un sistema de elevación de agua moderno, relacionado con la demanda de la agricultura de exportación en el siglo XX cuando bien el agua elevada de los pozos o la trasvasada por acequias y canales, había que enviarla a cotas más elevadas. Para ello se utilizó la estrategia conocida en Gran Canaria de construir un tomadero (pequeño estanque regulador) junto a la sala de máquinas con toda una infraestructura de motor térmico de potencia superior a los 40 CV tanto para la elevación de agua de un pozo o para las aguas de un canal o acequia.

La estrategia de elevación de agua de un tomadero es diferente en función de la naturaleza de las aguas. Así en una sala de máquinas para elevar agua de pozo el

motor tanto puede extraer el agua del pozo a través de una bomba de pistón como a la vez elevarla a cotas más altas mediante otra bomba acoplada al mismo pero del tipo centrífuga. De igual forma el motor podía extraer agua del pozo y elevarla desde el tomadero mediante bombas eléctricas sumergibles hasta la llegada de la red de fluido eléctrico que inutilizó a estos motores térmicos fijo. Pero fue el sistema de motor con bomba centrífuga el generalizado hasta los años setenta para elevar agua desde tomaderos hacia una cota superior por medio de una tubería metálica de presión y ya desde ese punto por gravedad se distribuye el agua hasta a kilométricas distancias (Suarez M., 1994).

5. Proyectos de I+D vinculados al binomio agua y energía

Es de interés comentar y transcribir en este capítulo las iniciativas realizadas por el Instituto Tecnológico de Canarias en materia de I+D sobre todo la que vincula la desalación de agua de mar con las energías renovables (EERR).

En el caso de los recursos hídricos no convencionales como la desalación de agua de mar por ósmosis inversa (OI), la electrodiálisis reversible (EDR) y reutilización de aguas, el factor limitante siempre será el consumo energético, no obstante se está trabajando en el sentido de alimentar estas instalaciones mediante energías renovables (EERR). En el caso del archipiélago Canario los parámetros ambientales y climáticos asociados a las energías renovables, están bastante estudiados por lo tanto si parece que sea posible establecer un futuro cercano de tecnologías de desalación masiva, mediante energías suministradas por las EERR.

Como ejemplo de investigaciones aplicadas se tienen los siguientes (extraídos de la web www.itccanarias.org).

5.1. Sistema planta desaladora-aerogenerador

Este proyecto ensayado en Canarias, en el citado instituto se conforma de un sistema compuesto por una planta de desalación de Osmosis Inversa con capacidad nominal de 17 m³/d acoplada eléctricamente a un aerogenerador de potencia nominal de 15 kW, con un sistema electrónico de control y un conjunto de cargas de disipación.

El sistema ensayado se presenta como unas soluciones viables técnica y económicamente para el abastecimiento de agua potable en zonas remotas, costeras o de interior alejadas de los núcleos urbanos con unas condiciones de viento adecuadas.

5.2. Sistema planta desaladora – paneles fotovoltaicos

Esta línea de investigación se basa en un sistema autónomo solar fotovoltaica-osmosis inversa con almacenamiento de energía y un sistema de control, la instalación es capaz de cubrir la demanda de agua de una zona aislada de la red eléctrica (50-75 habitantes) y con escasez de agua potable.

El sistema optimizado tiene una capacidad de producción de 400 L/h (a 60 bares) a partir de agua de mar funcionando una media de 8 horas diarias en verano y 6 en invierno. Está compuesto por una planta desaladora de agua de mar de ósmosis inversa (producción nominal: 3 m³/d) alimentada por un sistema fotovoltaico aislado (potencia pico: 4,8 kW; capacidad de baterías: 1.240 Ah).

Otro proyecto interesante es el DESSOL-SINBAT. El Instituto Tecnológico de Canarias inició a finales de 2004, un nuevo proyecto, que consiste en, diseñar y ensayar una planta desaladora de agua de agua por osmosis inversa a escala piloto alimentada energéticamente únicamente con energía solar fotovoltaica, pero sin hacer uso de baterías, con el fin de obtener un diseño comercial que pueda ser instalado de manera global en zonas aisladas con necesidades de agua potable.

6. Futuros proyectos hidroeléctricos en las islas Canarias

La energía hidroeléctrica se ha convertido en una prioridad para Canarias y una apuesta firme en las energías renovables con el fin de no depender tanto del petróleo y de cumplir con los objetivos del Plan Energético de Canarias (30% de la demanda eléctrica suplida mediante EERR).

6.1. Centrales hidroeléctricas reversibles

Los centros de control y despacho eléctrico tienen la misión de que la energía se genere en el momento de ser consumida. Las necesidades de almacenamiento de la electricidad se fundamentan en los siguientes puntos;

- La Gestión de la demanda valle y punta.
- Aislamiento de la carga.
- Control de la frecuencia eléctrica.
- Integración de las EERR.

Una central hidroeléctrica reversible, es una central de generación eléctrica capaz de turbinar agua para producir electricidad cuando hace falta o de bombear caudales (para lo cual necesitará energía) a un embalse superior cuando hay excedentes eléctricos en la red, cuando esta central se alimenta de la energía generada por turbinas eólicas se denomina hidroeólica y sería el caso de la isla de El Hierro en Canarias.

La central estándar para un medio insular consta de los siguientes elementos;

- Toma de agua de mar.
- Planta desaladora.
- Depósito-balsa inferior.
- Equipo de bombeo.
- Equipo de turbinado.
- Depósito-balsa superior.
- Conducciones.
- Parque eólico (cuando es central hidroeólica).

La Central se compone de un embalse inferior y un embalse superior comunicados por una tubería a presión en cuya base se sitúa la central eléctrica, cuando hablamos de sistemas insulares reducidos sin posibilidad de flujos continuos de agua o ríos, se necesita una fuente de agua que suele ser suplida por plantas desaladoras, no se estima conveniente utilizar tomas de agua directamente, por el incremento económico que tendrían los equipos y la dificultad técnica de ejecutar la toma en la costa. Cuanto mayor sea el desnivel de cota de los dos embalses, mayor es la cantidad de energía que es posible almacenar y turbinar.

Las centrales reversibles estudiadas en Canarias son:

- Soria – Chira 162 MW (Gran Canaria).
- Soria – Cueva de las niñas 150 MW (Gran Canaria).
- Tenerife 180 MW.
- El hierro 12,4 MW.
- El Quebradón 30 MW (La Gomera).
- Las Cancelitas 15 MW (La Palma).

Nota del autor: Las potencias se estiman que puedan variar a tenor de la evolución de la demanda.

6.2. Proyecto hidroeléctrico en el Hierro

El Proyecto del aprovechamiento Hidroeléctrico de El Hierro, tiene como objetivo el suministro eléctrico de un sistema aislado con energía totalmente renovable.

El proyecto pretende ser sostenible económicamente, por lo que se han elegido elementos generadores primarios de energía eléctrica contrastados que en un futuro próximo podrán ser rentables sin apoyos económicos externos. Nos referimos a que el sistema dispondrá como generador solamente energía eólica, dejando para más adelante los sistemas fotovoltaicos, de mareas y de olas, que aunque renovables todavía están lejos de ser rentables por sí mismos. Es evidente que si el sistema hubiese tenido recursos hidráulicos propios se hubiese dispuesto de una central hidráulica convencional, pero desgraciadamente ello no es posible en la isla de El Hierro, por lo que la regulación del sistema la asume una central reversible pura.

La idea original del proyecto surge en 1985 del departamento de I+D de Unelco, dirigido en aquel momento por Ricardo Melchor Navarro, el que en su día fuera Presidente del Cabildo Insular de Tenerife (q.e.p.d.), recientemente fallecido. La instalación en aquel momento se disponía entre Frontera y Las Puntas, disponiendo de un desnivel entre los depósitos de 1000 m. La potencia prevista era de 5 MW, suficiente en aquel momento para el suministro total de la isla. El parque eólico se situaba en la zona de Sabinosa, por considerar que era la zona más ventosa de la isla. Unelco intentó obtener ayudas para este proyecto, pero no fue posible conseguirlas, por lo que el Proyecto quedó aparcado esperando que los parámetros económicos de la generación eólica mejorasen haciendo más sostenible el Proyecto.

El 22 de enero de 2000, El Hierro fue declarado *Reserva de la Biosfera*, por lo que el Proyecto en su disposición original quedó comprometido medioambientalmente, ya que se situaba en una zona protegida.

La mejora en el equipamiento de generación eólica ha sido muy importante en los últimos años, pasando las potencias de 300 kW a varios MW en la actualidad, siendo en la mayoría de los casos sostenibles económicamente.

Con este nuevo planteamiento, se trató de buscar otro emplazamiento para el Proyecto con la ayuda del Cabildo de El Hierro presidido entonces por D. Tomás Padrón, encontrando como alternativa la que definitivamente se ha adoptado para el Proyecto.



Figura 12.11; Parque eólico de la Isla de El Hierro. (Santamarta JC, 2012)

Nos gustaría concluir el capítulo comentando que todavía existen muchas posibilidades para Canarias como alternativas al suministro eléctrico tradicional como son la energía de las olas y mareas o la energía generada por las corrientes oceánicas, muy estudiada en el archipiélago de Hawái.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a D. Juan Manuel Buil de la empresa ENDESA SA, la información suministrada sobre proyectos hidroeléctricos y los sistemas eléctricos canarios y a D. Octavio Rodríguez Delgado, profesor de la Universidad de La Laguna y cronista oficial de Güímar y Candelaria.

Bibliografía consultada y referencias

- AEI-clúster RICAM, Corporación 5, análisis y estrategia, SL (2010). *Análisis de los sobrecostes de la energía en los sistemas extrapeninsulares*. Estudio realizado para el Gobierno de Canarias.
- Castro Núñez, U. (2007): *El Calabazo*. Bienmesabe.org. (en línea, enero, 2012):
- DÍAZ RODRÍGUEZ, J. M. (1989): *Molinos de Agua en Gran Canaria*. Las Palmas de Gran Canaria.
- González Navarro, J. (1996): *Las salinas tradicionales de Gran Canaria*. FEDAC. Cabildo de Gran Canaria.
- González Navarro, J. (2008): «El patrimonio hidráulico en la prehistoria de Gran Canaria», en *La cultura del agua en Gran Canaria*, Consejería de Obras Públicas y Transportes del Gobierno de Canarias. Las Palmas de Gran Canaria, pp.25-34.
- Hernández Padrón, A. de J. y Jiménez Medina, A. M. (2001): "Fuentes públicas de Arucas. Gran Canaria", en *El Pajar. Cuadernos de Etnografía Canaria*, nº 9, pp. 94-100. La Orotava. Santa Cruz de Tenerife.
- Hernández Pérez, M^a.V. (2010): *El riego del Calabazo* (I y II). Conferencia de ingreso en la Academia Canaria de La Lengua, publicado en la revista digital:
- Hernández, M^a. V. y Hernández, A. (1990). "El calabazo", en VV.AA. *Juegos Deportivos Tradicionales* (pp. 197-219). Centro de la Cultura Popular Canaria. Santa Cruz de Tenerife.
- <http://www.bienmesabe.org/noticia/2010/Abril/riego-al-calabazo-tramas-para-su-pervivencia-i> (c. 11-IX-2011).
- INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CANARIAS. *Documentación de los proyectos de innovación tecnológica* (en línea). (Islas Canarias, España), (ref. Marzo 2006). Disponible en World Wide Web; <www.itccanarias.org>.
- LORENZO TENA, A. (2010): *Molinos de Agua: historia de los ingenios hidráulicos harineros de La Palma*. Ediciones Idea. Santa Cruz de Tenerife.
- Martín González, M. A.; Lorenzo Hernández, A.; Fernández Pérez, M.; Martín González, M. C.; Crossa Fernández, J. F.; García Martín, M^a. C.; Leguga Delgado, J.A. y Vallina Alonso, M^a. L. (2000): *Los Orígenes de la Electricidad en La Palma. El Electrón*. Cabildo de La Palma-Caja de Canarias. Colegio de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Tenerife. La Palma. Islas Canarias.
- PEÑATE B., MARTEL, G. Y PIERNABIEJA (2004). 40 años de desalación de aguas en el archipiélago canario. Instituto Tecnológico de Canarias.
- Rodríguez Delgado O., 2009. "El Barranco del Agua de Güímar, un espacio natural de gran interés botánico, turístico y etnográfico". In Beltrán Tejera, E., J. Afonso-Carrillo, A. García Gallo & O. Rodríguez Delgado (eds.): *Homenaje al Profesor D. Wilfredo Wildpret de la Torre*: 181-212. Instituto de Estudios Canarios. La Laguna (Tenerife, Islas Canarias). Monografía LXXVIII.
- SANTAMARTA CEREZAL, J.C.; RODRIGUEZ J. (2008). *Singularidades de las obras hidráulicas para abastecimiento de agua potable en medios volcánicos. El caso del archipiélago Canario*. España. Congreso Internacional sobre Gestión y Tratamiento del Agua. Córdoba, Argentina.
- SANTAMARTA CEREZAL, J.C. (2009) *Singularidades sobre la construcción, planificación y gestión de las obras y recursos hídricos subterráneos en medios volcánicos. Estudio del caso en las Islas Canarias occidentales*. Tesis (Doctoral), E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos (UPM) [En línea]. Universidad Politécnica de Madrid 2010, [ref. de 15 Octubre 2010]. Disponible en Web: <http://oa.upm.es/3389/>
- SANTAMARTA CEREZAL, J.C. (2009). *La minería del agua en el archipiélago canario*. Sociedad Española para la Defensa del Patrimonio Geológico y Minero. De Re Metallica, 12 1-8.Madrid.
- SANTAMARTA CEREZAL, J.C. ITZJAK, M. EVLAGON, D. 2010; *Forest hydrology for increasing water resources and run-off in semiarid zones. The case of the Canary islands and the semiarid zone of Israel*. 24th IUFRD Conference for Specialists in Air Pollution and Climate Change Effects on Forest Ecosystems: Adaptation of Forest Ecosystems to Air Pollution and Climate Change. Antalya. Turkey

- SOLER LICERAS, C. (2008): “El pozo de Los Padrones”, en *La cultura del agua en El Hierro*. Gobierno de Canarias. Consejería de Infraestructuras, Transporte y Viviendas. Dirección General de Aguas. Islas Canarias. pp. 121-138.
- SOSA DÍAZ J. A. Y PALERM SALAZAR J. M. (1985-1986): *Periferia*, nº 4-5. Colegio de Arquitectos de Andalucía Occidental. Sevilla, pp. 69-90.
- SUÁREZ MORENO, F. (2001): *La cultura del cereal...* “Molinos de Agua” 107-109”. Ayuntamiento de Mogán-Ayuntamiento de La Aldea.
- SUÁREZ MORENO, F. (1994): *Ingenierías históricas de La Aldea*. Cabildo de Gran Canaria. Las Palmas de Gran Canaria.
- SUÁREZ MORENO, F. y SUÁREZ PÉREZ, A. (2005): *Guía del Patrimonio Etnográfico de Gran Canaria*. Cabildo de Gran Canaria. Las Palmas de Gran Canaria.

Depuración de aguas en medios insulares

Cintia Hernández Sánchez

1. Introducción

En las últimas décadas, todas las administraciones a nivel europeo, estatal o autonómico han aprobado una serie de Directivas, Leyes, Reales Decretos, etc., con el objetivo de reducir y, si es posible eliminar, los impactos que una serie de actividades producen sobre el medio ambiente. De forma específica, la política ambiental europea tiene entre sus principios fundamentales, la conservación, protección y mejora de la calidad del agua, así como la utilización prudente y racional de los recursos naturales (Art. 130R del Tratado de la Unión Europea).

Tras la Primera Guerra Mundial, se introdujeron y usaron elevadas cantidades de sustancias químicas. En la Segunda Guerra Mundial, el número y cantidades de sustancias en uso aumentaron notablemente debido al desarrollo industrial acelerado. Fue durante la Revolución Industrial cuando comenzaron a ser palpable los efectos que los seres humanos pueden causar al medio ambiente. A partir de este momento, los países industrializados comenzaron a tener una mayor preocupación por el medio ambiente y sobre todo, una gran inquietud por las pérdidas económicas que conlleva la degradación de este. También fue evidente la aparición de estos nuevos residuos industriales en las aguas residuales urbanas (Albert, 2010).

Generalmente, las aguas residuales presentan una serie de características comunes, que permiten que los métodos utilizados para su tratamiento sean uniformes. Pero, esto no significa que la composición de las aguas residuales, incluso cuando su origen sea exclusivamente doméstico, sean homogéneas. Su composición variará en

función de factores como hábitos alimentarios, uso de trituradoras de basura, consumo de agua, temperatura ambiental, uso de jabones, detergentes y desinfectantes, etc. (Arias et al, 2009)

La reutilización de aguas se ha venido llevando a cabo desde la antigüedad en muchos países. En otros países, la reutilización de aguas, se introduce por la necesidad inminente debido a su escasez, como sucede en todos aquellos países pioneros en esta técnica (Israel, Túnez, Chipre, Jordania) (Argaman, 1989). También, las grandes ciudades comenzaron a hacer uso de esta técnica, debido a los problemas de salud pública que estos vertidos podían causar en los cauces públicos. Pero actualmente, la depuración, además de ser una necesidad es una obligación legal. De hecho, existe una Directiva comunitaria, un Plan Nacional de Saneamiento y Depuración, una Ley del Plan Hidrológico Nacional, además de las normativas autonómicas, que hacen de la Depuración una obligación.

Las Islas Canarias se caracterizan por ser una región con escasez hídrica, esto junto a la particularidad de cada isla por ser un sistema aislado, crea una inminente necesidad de reutilizar sus aguas. De hecho, según el Libro Digital del Agua perteneciente al Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino, Canarias cuenta con 1.230.400 habitantes equivalentes que disponen de 56 Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR), 3 de las cuales se encuentran en estado de inactividad (Libro Digital del Agua, 2008).

2. Breve reseña histórica

La reutilización de aguas residuales, es una técnica que se ha venido practicando desde la antigüedad. Ciertamente, el empleo de aguas residuales en riego agrícola se remonta a unos 5.000 años atrás, así lo evidencian los desarrollados sistemas de alcantarillado presentes en los antiguos palacios y ciudades de la civilización-minoica (Angelakis y Spiridakis, 1995; Vera, 1998). Asimismo, en China, India, Japón, Corea, Malasia e Indonesia, la reutilización de aguas residuales es una costumbre aceptada desde muy antiguo (Nkuchia, 1994).

Durante el último cuarto del siglo XX, los beneficios de fomentar la reutilización de agua residual como medio de complementar los recursos de agua han sido reconocidos por la mayoría de los gobiernos estatales de los Estados Unidos así como por la Unión Europea. Por ejemplo, en 1970, la normativa del agua del estado de California definió, como principio básico de la misma, conseguir que el estado esta-

bleciera todas las vías posibles que asegurasen el desarrollo de las instalaciones de reutilización del agua necesarias para satisfacer las futuras necesidades de agua del Estado (California State of Administrative Code, 1978; Vera, 1998).

En lo que se refiere a las técnicas de depuración de aguas, éstas se desarrollaron en su mayoría durante los años cincuenta y sesenta y casi todas las soluciones técnicas hoy empleadas proceden de investigaciones hechas entonces. En la última década se ha progresado especialmente en la solución de problemas concretos, como, por ejemplo, los relacionados con la contaminación industrial, las técnicas de desinfección o las normativas legales para la reutilización de las aguas depuradas (Baker, 1981; Crook, 1985; Montgomery Inc., 1985; Hernández, 1989; Vera, 1998). Un paso importante para los tratamientos biológicos en aguas residuales fue el desarrollo del proceso de lodos activos en 1904. Asimismo, los avances realizados en el campo de la microbiología a partir de los últimos años del siglo XIX han permitido el desarrollo de las técnicas de desinfección y la eliminación de las fuentes de cólera, tifus y disentería (Asano y Levine, 1995).

Las normativas internacionales dadas por la Organización Mundial de la Salud (OMS) consideran libre de patógenos aquellas aguas que presenten menos de 1UFC (Unidades Formadoras de Colonias)/100 mL. Por otro lado, el actual Real Decreto 1620/2007, de aplicación a partir del 9 de diciembre del 2009 en España, considera para uso urbano residencial 0 UFC /100mL, siendo más restrictivo que la OMS para éste uso del agua en concreto.

Las tecnologías de depuración de aguas han avanzado tanto en los últimos años que, en comunidades donde el agua residual depurada se ha añadido a las fuentes de agua potable, no se han encontrado efectos adversos para la salud. Este es el caso del condado de Los Ángeles, donde desde 1962 se ha empleado agua depurada para recargar pozos de agua subterránea. El estudio realizado en 1984 por las autoridades sanitarias de este condado, determinó que los riesgos asociados al empleo de agua depurada con esta finalidad eran análogos a los que se presentan si se emplea agua de lluvia con esta misma finalidad (Nkuchia, 1994). En España, los proyectos de reutilización datan de los años sesenta, pero la mayoría de los planes de depuración y de reutilización se han realizado en las décadas 70 y 80. En general, el tipo de reutilización de aguas residuales más extendido y común es el riego de cultivos.

Aunque las aguas residuales se han utilizado principalmente para riego agrícola, también existen otras aplicaciones. En China, los nutrientes de las aguas residuales se han empleado durante siglos en piscifactorías y actualmente se emplean para fertilizar balsas. El empleo del agua residual en piscicultura también es una práctica

común en la India, Perú e Indonesia. En Japón, la reutilización del agua residual para su uso en las cisternas de los urinarios de edificios públicos es una práctica obligada por la ley.

3. Las tecnologías de depuración y regeneración de aguas residuales

Las tecnologías de depuración de aguas residuales constan de un conjunto de procesos y operaciones que, colocadas de una forma determinada, tienen por objetivo eliminar del agua ciertos componentes no deseados.

En general, los procesos y operaciones para eliminar los componentes no deseados de las aguas residuales constan de las siguientes etapas:

- Tratamiento previo o pretratamiento.
- Tratamiento primario.
- Tratamiento secundario.
- Tratamiento terciario.

Tras un tratamiento secundario, el agua sería apta para ser evacuada por el emisario submarino, pero sin embargo, no sería apta para reutilizarla en otros usos, tal y como expone el RD 1620/2007. Para llevar a cabo una reutilización del agua para los usos expuestos en este RD, es estrictamente necesaria una regeneración de esta. La regeneración de agua precisa de un tratamiento terciario, el cual permite dar al agua la calidad exigida.

La primera etapa de pre tratamiento, tiene como objetivo la separación o eliminación de las sustancias sólidas de mayor tamaño, ya que estos pueden provocar problemas de mantenimiento y funcionamiento de los diferentes procesos. Normalmente consiste en un desbaste para la eliminación de sólidos gruesos y trapos, una flotación para la eliminación de grasas y aceites y por último, el desarenado para la eliminación de la materia en suspensión gruesa. Para el pretratamiento, se utilizan generalmente procesos mecánicos y físicos tal y como se muestran en las figura 13.1.



Figura 13.1; Reja de 8 cm. (Hernández-Sánchez C, 2009)

El tratamiento primario trata de eliminar los sólidos en suspensión de pequeño tamaño y una pequeña parte de la materia orgánica. Esta eliminación suele llevarse a cabo mediante operaciones físicas como pueden ser el tamizado y la sedimentación.



Figura 13.2; Decantador. (Hernández-Sánchez C, 2010)



Figura 13.3; Cubas de aireación. (Hernández-Sánchez C, 2010)



Figura 13.4; Dual Sand para tratamientos terciarios. (Hernández-Sánchez C, 2009)

El tratamiento secundario y tercera etapa, está enfocado a la eliminación de la materia orgánica disuelta en el agua. Está demostrado que el proceso de oxidación biológica es el método más efectivo y económicamente más rentable. Este proceso consiste en que las bacterias en presencia de oxígeno, hacen de esta materia orgánica su alimentación y por tanto, producen la disminución de ésta de forma natural.

La regeneración de las aguas residuales, exige de tratamiento terciarios para asegurar la existencia de un agua de calidad, tal y como el RD 1620/2007 exige a España. Estos tratamientos tratan de eliminar los nutrientes, los compuestos tóxicos, los excesos de materia orgánica y los sólidos en suspensión o disueltos. Durante los últimos años, se ha avanzado mucho en los tratamientos terciarios, tendiendo principalmente a buscar tratamientos más eficientes y menos costosos energéticamente. Los procesos u operaciones unitarias normalmente empleados en los tratamientos avanzados son la coagulación química, floculación, sedimentación más filtración, el intercambio iónico (figura 13.4) o la ósmosis inversa.

4. Aplicación de los usos del agua al caso concreto de Santa Cruz de Tenerife

La Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) de Santa Cruz de Tenerife recoge las aguas de la red de alcantarillado procedentes de la zona de La Laguna y parte alta de Santa Cruz. Dos estaciones de tratamiento primario abastecen a esta EDAR (Los Llanos a nivel del mar y Buenos Aires a 105 m.s.n.m). El volumen de aguas residuales recibida normalmente por esta estación, está en torno a los 45.000 m³/día; cifra que puede variar en función de la época del año. Esta EDAR posee tres líneas de depuración (normalmente dos en funcionamiento y una para labores de mantenimiento y limpieza). La EDAR está dimensionada para un caudal teórico de 90.000 m³/día y lleva a cabo para la depuración de sus aguas un tratamiento biológico por fangos activos.

Los procesos y operaciones llevados a cabo por esta EDAR para eliminar los componentes no deseados, son los siguientes.

PRETRATAMIENTO: rejas de gruesos y finos (20 cm y 8 cm de pasos de luz) y un tamiz de 8 mm para eliminar o separar los sólidos más gruesos del agua. Tornillo sinfín para prensar y comprimir los sólidos procedentes de los distintos tamices y recuperar el agua existente en estos.



Figura 13.5; Tornillo sinfín (Hernández-Sánchez C, 2009)

A continuación esta EDAR cuenta con un canal de desarenado y desengrasado, para eliminar del fondo las partículas arenosas y de las superficie las partículas grasas y espumosas.

El tratamiento primario de la EDAR de Santa Cruz consta de unos decantadores primarios circulares con una velocidad de 1.5 m/min, que permite evitar las turbulencias o un flujo preferencial del agua que impediría su buen funcionamiento. La velocidad de giro de los brazos del decantador es lenta, fijándose en 45 minutos por vuelta. La función de estos brazos giratorios es barrer de forma continua tanto el fondo como la superficie. Las formas jabonosas y resto de partículas flotantes recogidas por este brazo, se exportan mediante una arqueta al contenedor correspondiente.

Finalmente el tratamiento secundario llevado a cabo en esta EDAR es el tratamiento biológico por fangos activos en el que las bacterias aeróbicas funcionan en su mayor rendimiento a 3 mg/L de oxígeno, por lo que existe un medidor en continuo que mantiene esta concentración de oxígeno en el agua. La segunda parte del tratamiento biológico consiste en un clarificador secundario con una velocidad de entrada de 1 m/min. En esta segunda parte del tratamiento, se busca la decantación de los flóculos producidos en la primera parte.

Este último tratamiento aporta un agua depurada que para poder regenerarse, tendrá que pasar por un tratamiento terciario.



Figura 13.6; Arqueta de recogida de formas jabonosas (Hernández-Sánchez C, 2009)

El tratamiento terciario existente en la EDAR de Santa Cruz está compuesto por unos filtros convencionales o filtros de arena, seguido de un filtro dual sand y por último una electrodiálisis reversible para eliminar todas aquellos elementos con carga que queden en el agua

La demanda concreta exigida por la ciudad de Santa Cruz está en torno a 2.500 m³/día. El agua regenerada producida por la EDAR es usada para riego de parques y jardines y limpieza de viales.

El resto del agua residual producida en la EDAR de Santa Cruz sale directamente del tratamiento secundario (clarificador) y es acumulada en el depósito regulador del Tablero desde donde mediante por gravedad, es conducida unos 60 km hasta la balsa situada en Valle San Lorenzo. Se transportan por esta tubería unos 25.000 m³/día, siendo el tiempo de residencia del agua en la conducción de unas 16 horas. Una vez el agua localizada en el “Complejo Agro-Hidráulico de Valle san Lorenzo”, sufre distintos tratamientos hasta llegar a ser agua regenerada y poder ser usada principalmente para riego agrícola o riego de campos de golf. El agua es enviada hasta el sur debido a las necesidades hídricas que en esta zona existen.

Una vez finalizado el tratamiento terciario en esta EDAR, el agua será utilizada para distintos usos en función de la calidad que posea. Los usos que requiere el RD

1620/2007 son en resumen, los siguientes (cada uno con sus exigencias en cada parámetro):

Las aguas regeneradas a partir de aguas residuales constituyen un recurso no convencional que se ha desarrollado en los últimos decenios. Este recurso cada vez más, se introduce en el proceso de planificación hidrológica y presenta muchos beneficios como pueden ser la disminución del efecto negativo por vertido de aguas sin tratar al mar, aprovechamiento y reutilización de nutrientes para la agricultura e incrementar los recursos disponibles ya que se evita la extracción de estos volúmenes del subsuelo u otras masas superficiales de agua. Por otro lado, también posee inconvenientes como pueden ser el gasto energético o los polémicos problemas de olores (Hernández-Sánchez, 2010).

Lo que se pretende con la nueva legislación es que las aguas depuradas constituyan un recurso de alta fiabilidad sin crear posibles problemas de salud pública y que además estas aguas presenten una producción garantizada. El principal problema que trunca los beneficios de depurar, se fija en el elevado gasto energético que estas plantas producen. La meta que presentan los ingenieros en la actualidad ya no es tanto mejorar los tratamientos de las aguas depuradas, sino mejorar las eficiencias energéticas de estos tratamientos (Hernández-Sánchez, 2010).

5. La depuración en Canarias

Las Islas Canarias se caracterizan por tener unas necesidades hídricas especiales, cada isla independientemente y distintas que otras comunidades. La característica insular limita totalmente la posibilidad de transportar agua desde otros puntos.

Según el Instituto Nacional de Estadística (INE), los datos correspondientes al volumen de agua reutilizado ($\text{m}^3/\text{hab}/\text{día}$) por Comunidades Autónomas en el año 2008, son los que se muestran a continuación:

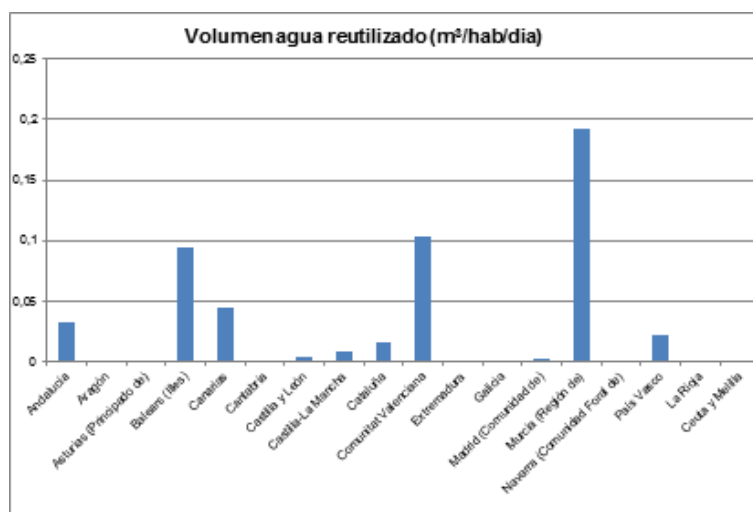


Figura 13.7; Histograma correspondiente al volumen de agua reutilizado (m³/hab/día) por Comunidades Autónomas. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del INE.

Como puede observarse en la figura 13.7, la comunidad autónoma que mayor volumen de agua reutiliza es la Región de Murcia, seguida de la Comunidad Valenciana. Ambas Comunidades Autónomas se caracterizan por ser regiones agrícolas y por tanto, necesitan gran cantidad de agua reutilizada. A continuación, le siguen los sistemas insulares de Islas Baleares e Islas Canarias. Aunque no son las siguientes comunidades en cuanto a número de habitantes o habitantes equivalentes, sí son las siguientes comunidades con mayor volumen de agua reutilizado; por tanto, se hace palpable, las necesidades de autoabastecimiento que necesitan estos sistemas aislados.

Centrándonos en el Archipiélago canario, se puede observar en la tabla 13.1, algunos valores de volúmenes de agua que describen en parte la evolución de esta. Podemos encontrar valores indicadores como la producción total del agua residual por islas, el agua residual urbana depurada y el agua residual urbana que es realmente reutilizable (www.fcca.es). Como vemos, desde la producción del agua hasta que el agua es reutilizada existen pérdidas que en muchos casos, son difíciles de cuantificar. La mayoría del agua reutilizada producida en Canarias tiene como origen agua residual urbana, ya que la industria en sí en alguna de las islas es prácticamente inexistente. A continuación, se exponen distintos volúmenes de agua desde su producción total hasta su reutilización, estos datos corresponden al Centro Canario del Agua (www.fcca.es) y corresponden a una fecha anterior al año 2008.

Tabla 13.1: Volumen de agua residual (hm³) por año distribuido en las distintas islas del Archipiélago canario. Fuente: Fundación Centro Canario del Agua (*www.fcca.es*)

Volumen (hm ³ /a)	Lanzarote	Fuerteventura	Gran Canaria	Tenerife	La Gomera	El Hierro	La Palma
Producción total de A.R	9,1	6,8	45,8	56,2	1,4	0,4	3,7
A.R. urbana depurada	6,1	3,9	27	14,2	0,4	0,1	1,8
A.R. urbana reutilizada	3,8	1,4	7,2	8	0	0	0,1

En cuanto a producción de agua residual por islas, se puede observar en la figura 13.8 y cuantificar en la Tabla 13.1, que la isla de Tenerife es la que más agua residual produce con un 46% (56.2 hm³/año) de la producción total. Las siguiente isla en mayor producción de agua residual es Gran Canaria con un 37% del total (45.8 hm³/año). A continuación le sigue Lanzarote con el 7% (9.1 hm³/año), Fuerteventura con el 6% (6.8 hm³/año), La Palma con el 3% (3.7 hm³/año), La Gomera con el 1% (1.4 hm³/año) y El Hierro sin representación porcentual por producir tan solo 0.4 hm³/año.

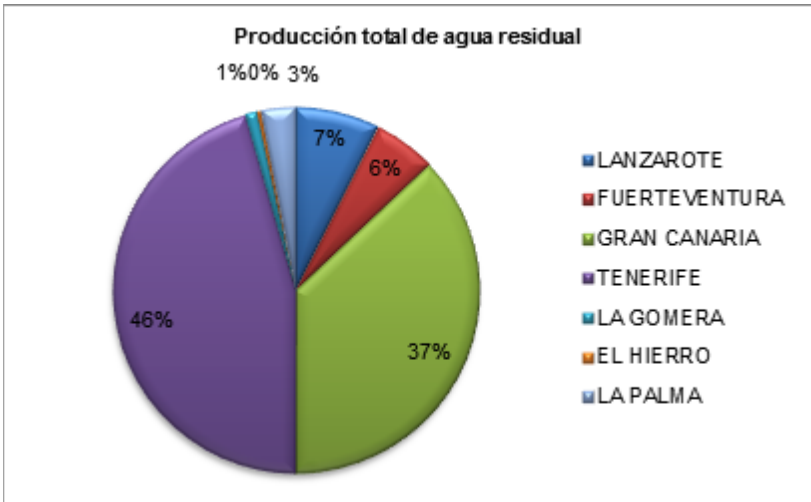


Figura 13.8; Porcentaje de producción total de agua residual en las islas del archipiélago. Fuente: Fundación Centro Canario del agua (*www.fcca.es*).

Centrándonos en la depuración de agua residual urbana en las distintas islas, podemos ver en la figura número 13.9 y cuantificar en la tabla número 13.1, que la distribución por islas varía con respecto a la producción total de agua residual, poniéndose a la cabeza en depuración la isla de Gran Canaria con un 51% (27 hm³/año),

seguida de Tenerife con un 27 % del total ($14.2 \text{ hm}^3/\text{año}$), Lanzarote con un 11% ($6.1 \text{ hm}^3/\text{año}$), Fuerteventura con un 7% ($3.9 \text{ hm}^3/\text{año}$), La Palma con un 3 % ($1.8 \text{ hm}^3/\text{año}$), La Gomera 1% ($0.4 \text{ hm}^3/\text{año}$) y por último, el Hierro representando un 0 % debido a que tan solo depura $0.1 \text{ hm}^3/\text{año}$ de sus aguas residuales. La posibilidad de depurar aguas está directamente relacionada con las infraestructuras disponibles para llevar a cabo los tratamientos, cuya inversión principal para la realización de la obra es muy elevada.

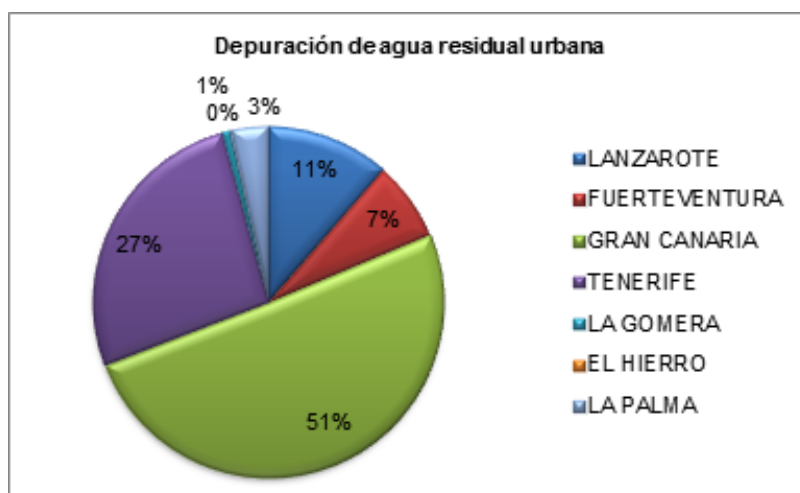


Figura 13.9; Porcentaje de depuración de aguas residuales urbanas en las distintas islas. Fuente: Fundación Centro Canario del agua (www.fcca.es).

En la figura número 13.10 y cuantificable por la tabla número 13.1 se puede ver la reutilización de agua residual urbana en las distintas islas. La reutilización de aguas supondría el agua que realmente es aprovechada en distintos usos, por tanto el ciclo de producción de agua quedaría cerrado con el de reutilización de esta. Podemos ver que tanto la isla de La Gomera como la isla del Hierro, reutilizan $0 \text{ hm}^3/\text{año}$ de las aguas urbanas producidas, y no porque no tengan carencia de estas aguas. La Palma tan solo reutiliza $0.1 \text{ hm}^3/\text{año}$, aumentando en Islas como Fuerteventura con un $1.4 \text{ hm}^3/\text{año}$, Lanzarote con $3.8 \text{ hm}^3/\text{año}$, Gran Canaria con $7.2 \text{ hm}^3/\text{año}$ y Tenerife con $8 \text{ hm}^3/\text{año}$. Este volumen en porcentaje se puede ver en la gráfica número 5 y tal como se puede observar, Tenerife reutiliza un 51 % del total de las aguas reutilizadas producidas en las islas, lo que posee un sistema de producción-reutilización más eficaz que en otras islas.

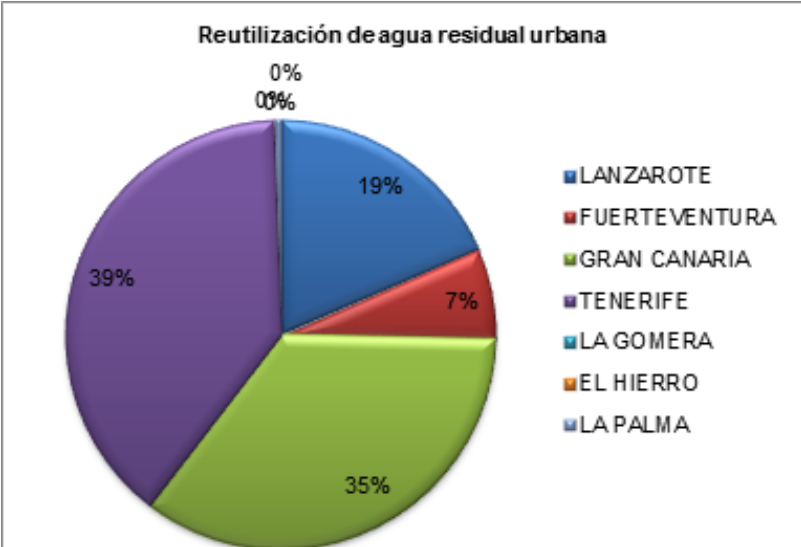


Figura 17.10; Reutilización de agua residual urbana según las diferentes islas. Fuente: Fundación Centro Canario del agua (www.fcca.es).

La isla de Tenerife se caracteriza por ser la que mayor volumen y porcentaje de reutilización de aguas lleva a cabo (tal y como se muestra en las gráficas 3-5). Según se puede apreciar en la tabla número 13.2, la evolución histórica del volumen de agua en la Isla de Tenerife se distribuye de la siguiente manera:

Tabla 13.2: Evolución histórica del Volumen de Agua en la Isla de Tenerife. Fuente: Consejo Insular de Aguas de Tenerife (www.aguastenerife.org).

VOLUMEN DE AGUA EN LA ISLA DE TENERIFE	1991	2000	2004
	hm ³ /año	hm ³ /año	hm ³ /año
Aguas Superficiales	1	0,5	0,5
Aguas Subterráneas	203	196	197
Manantiales	8	4	4
Reutilización	0	8	13
Desalación	0	7	12
TOTAL	212	216	226

Debido a que el mayor recurso hídrico de la isla de Tenerife procede de aguas subterráneas, se ha procedido a dividir por 10 los recursos hídricos subterráneos para conseguir un dato representativo y comparable con el resto de valores.

Como se puede ver en la tabla número 13.11, correspondiente al estudio de la distribución de los recursos hídricos durante el año 1991, el mayor recurso disponible en la isla de Tenerife es el agua subterránea ($203 \text{ hm}^3/\text{año}$), suponiendo el agua de manantial $8 \text{ hm}^3/\text{año}$ y las aguas superficiales tan solo $1 \text{ hm}^3/\text{año}$. Por últimos la desalación y reutilización estaban ausentes durante el año 1991 en la isla de Tenerife.

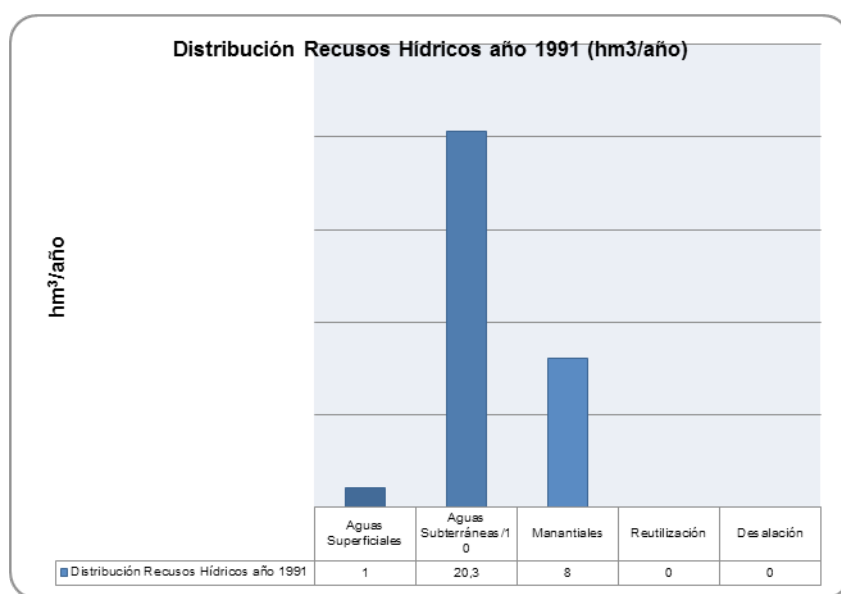
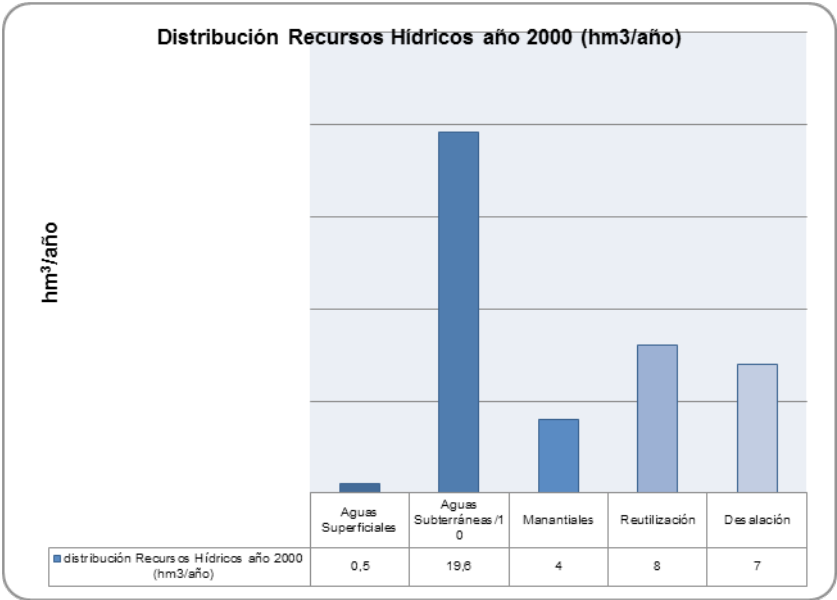


Figura 13.11: Histograma de la evolución histórica de los recursos hídricos en el año 1991.
Fuente: elaboración propia a partir de los datos del Consejo Insular de Aguas de Tenerife.

En el año 2000, la distribución de los recursos hídricos en la isla de Tenerife, se realiza de manera parecida, aunque comienza la representación de la reutilización ($8 \text{ hm}^3/\text{año}$) y de la desalación ($7 \text{ hm}^3/\text{año}$). Se superan en ambas tecnologías no convencionales el agua procedente de manantiales, que ha sufrido una drástica disminución del 50 % respecto al año 1991 debido probablemente a la explotación del agua subterránea de galería y pozos. También existe una pequeña disminución de los recursos hídricos subterráneos, fijándose en el 2000 en $196 \text{ hm}^3/\text{año}$.



Gráfica 13.12: Histograma de la evolución histórica de los recursos hídricos en el año 2000
Fuente: elaboración propia a partir de los datos del Consejo Insular de Aguas de Tenerife.

Por último con los últimos datos del año 2004, es apreciable que a medida que aumentan las infraestructuras necesarias de depuración, comienza también a aumentar los recursos no convencionales como reutilización y regeneración tal y como se muestra en la figura 13.13.

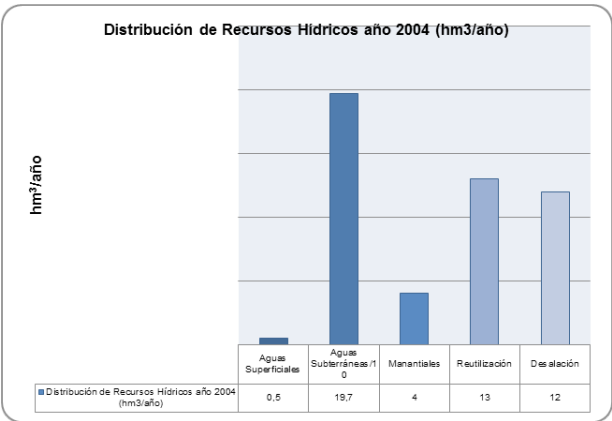


Figura 13.13: Histograma de la evolución histórica de los recursos hídricos en el año 2004. Fuente: elaboración propia a partir de los datos del Consejo Insular de Aguas de Tenerife.

Finalmente en la figura 13.14, se puede apreciar el rápido crecimiento producido por las tecnologías no convencionales de producción industrial de aguas en la isla de Tenerife.

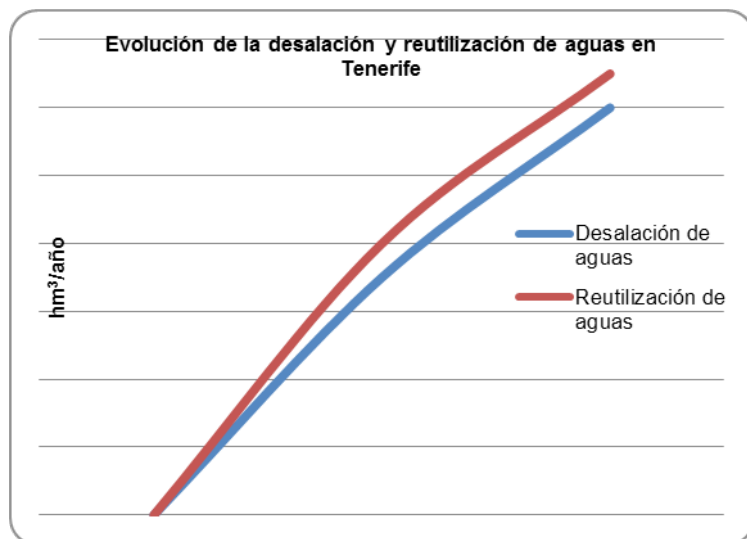


Figura 13.14: Evolución histórica de la desalación y la reutilización de aguas en la isla de Tenerife. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del Consejo Insular de Aguas de Tenerife.

Bibliografía consultada y referencias

- ALBERT. "Catástrofes tóxicas. (2010). En M. Repetto (ed.) Postgrado en Toxicología. Ilustre colegio oficial de Químicos. Sevilla. CD_ROM. 2010. ISBN: SE-1047-08.
- ANGELAKIS, A.N. Y SPYRIDAKIS, S. (1995). The status water resources in Minan times: a preliminary study. Angelakis, A.N. and Isaar, A., Editors, Diachronic Climatic Impacts on Water Resources in Mediterranean Region. Springer-Verlag, Heidelberg, Alemania.
- ARGAMAN, Y. (1989). Wastewater reclamation and reuse in Israel. Proceedings of the 26th Japan Sewage Works Association. Annual Technical Conference, Tokyo, Japón.
- ARIAS RODRÍGUEZ, A; RODRÍGUEZ ÁLVAREZ, C; ARÉVALO MORALES, MP. Capítulo 30. Medicina Preventiva y Salud Pública, Piédrola Gill 11ª Edición. Editorial Elsevier Masson 2009.
- ASANO, T. Y LEVINE, A.D. (1995). Wastewater Reclamation, Recycling and Reuse: Past, Present, and Future. Proceedings of the Second International Symposium on Wastewater Reclamation and Reuse, Creta, Grecia
- BAKER, M.N. (1981). The quest pure water, 2nd Ed., American Water Works Association, New York.
- CALIFORNIA STATE OF ADMINISTRATIVE CODE, (1978). California Department of Health (CDH) (1977). A manual for the control of communicable disease in California. California Office of State Printing, Sacramento, California.
- CONSEJO INSULAR DE AGUAS DE TENERIFE, (2011). www.aguastenerife.org

- CROOK, J. (1985). Health and Regulatory Considerations. En: G.S. Pettygrove y T. Asano (eds.). *Irrigation with Reclaimed Municipal Wastewater-A Guidance Manual*. Lewis Publishers, Inc. 121 South Main St., Chelsea, M.I. 48118, USA.
- HERNÁNDEZ-SÁNCHEZ C. (2010). Optimización medioambiental de las aguas regeneradas de una EDAR. Evaluación toxicológica de los lodos según RD 131071990. Proyecto fin de carrera Ingeniería Técnica de Obras Públicas. Universidad de La Laguna.
- HERNÁNDEZ SUÁREZ M. (1989). Manual para la reutilización de las aguas residuales urbanas depuradas de Tenerife. Área de Planificación y Desarrollo. Sección de Planificación Hidráulica. Cabildo Insular de Tenerife.
- FUNDACIÓN CENTRO CANARIO DEL AGUA. (2011). <http://www.fcca.es/>
- LIBRO DIGITAL DEL AGUA. (2008). Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Marco socioeconómico, Infraestructuras hidráulicas. http://servicios2.marm.es/sia/visualizacion/lda/socioeconomico/infraestructuras_edar.jsp
- MONTGOMERY, I.M. Consultant Eng. Inc. (1985). *Water Treatment: Principles and Design*. John Wiley and Sons, New York.
- NKUCHIA, J.M. (1994). Why Should Anyone Use Reclaimed Water?. *Water Environment & Technology*, 6 (4), 10.
- TRATADO DE LA UNIÓN EUROPEA. (1992). Maastricht. Holanda.
- VERA, L M. (1998). Microfiltración de aguas residuales depuradas. Mejora del flujo de permeado por inyección de gas. Tesis Doctoral. ULL. Tenerife

Reactores biológicos para regenerar aguas residuales

Sebastián Delgado Díaz

1. Introducción

Se denominan aguas residuales, en general, aquellas aguas que han sido alteradas en su composición, como consecuencia de su uso en actividades diversas, que las convierten en una potencial amenaza para los seres vivos y el medio ambiente. Estas aguas deben ser sometidas a tratamientos de depuración antes de ser vertidas al medio o ser reutilizadas en otras aplicaciones.

Según el origen, las aguas residuales se clasifican como industriales, domésticas o urbanas, agropecuarias, etc. Las aguas residuales urbanas se caracterizan por su contenido en materia fecal, y reciben el nombre de aguas negras; sin embargo, en ciertas actividades domésticas se producen aguas residuales que no contienen materia fecal (aguas procedentes de duchas, lavabos, fregaderos, lavadoras) y reciben el nombre de aguas grises.

2. Notas históricas sobre la evacuación y la depuración de las aguas residuales urbanas

La idea de separar las aguas residuales domésticas del entorno familiar, para evitar enfermedades, data desde épocas muy antiguas. Ya en el año 600 A.C., los romanos

construyeron redes de alcantarillado, tales como la “Cloaca Máxima” de la ciudad de Roma, para la evacuación al río Tiber de las aguas residuales de la ciudad; sin embargo, la recogida de aguas residuales para su tratamiento no aparece hasta épocas más recientes.

Hasta 1842, en el Reino Unido las aguas residuales domésticas y los sólidos se arrojaban a la calle, donde sufrirían la degradación y dispersión natural.

La evacuación de las aguas residuales domésticas se convirtió en el problema principal sanitario del siglo XIX. Se pensaba que la acidez de este tipo de aguas ayudaría a destruir los microbios de los vertidos humanos evacuados a los ríos, por lo que eran consideradas como aguas beneficiosas para mantener la calidad del agua de los ríos, de donde se tomaría agua abajo para el suministro a la población.

Los acontecimientos de mayor interés relacionados con las aguas residuales en los siglos XIX y XX se resumen de la forma siguiente (según Petulla, 1987, tomada del libro de G. Kiely, 1999):

- 1842 En el Reino Unido, Edwin Chadwick, Secretario de la Comisión Legislativa de los Pobres, pide soluciones de ingeniería para resolver problemas de salud pública derivados de la evacuación de aguas residuales:
- Equipar a cada alojamiento con agua potable limpia
 - Eliminar el agua residual de las viviendas y recogerlas en una red de tuberías
 - Aplicar las aguas residuales recogidas al terreno agrícola
- 1847 Se funda la Asociación Médica Americana. Reivindica su función sanitaria y declara la intención de realizar encuestas sobre saneamiento.
- 1848 Inglaterra: se relaciona las fiebres tifoideas con agua contaminada del saneamiento. Se aprueba la ley de salud pública nacional.
- 1860 Pasteur experimenta con microbios y vacunas. Establece y demuestra su teoría del germen para explicar muchas enfermedades.
- 1876 La Ley inglesa de contaminación de ríos declara delito descargar aguas residuales a los cauces.

- 1880 Estados Unidos dispone de cerca de 600 sistemas de infraestructura hidráulica, pero la mayoría de los saneamientos vierten agua no tratada a ríos, cauces y lagos. Las revistas de ingeniería discuten sobre tubería única o saneamiento separado (alcantarillado unitario o separativo).
- 1890 Aparecen serias epidemias de tifus. Se introduce el cloro para purificar los suministros de agua. La sociedad médica reivindica los temas de salud pública y van a favor del tratamiento de las aguas residuales en vez de la dilución propuesta por las ingenierías.
- 1905-7 Pensilvania aprueba una ley que prohíbe a las ciudades verter agua residual no tratada
- 1914 Ardern y Lockett, en Manchester, descubrieron que cuando se aireaba el agua residual orgánica en tanques de decantación, después de algunos días el efluente del tanque ofrecía menor demanda de oxígeno. Se había descubierto el proceso biológico de lodos activados.

Han de pasar muchos años hasta que se toma verdadera conciencia de la problemática ambiental y de la necesidad del establecimiento de normativas sobre calidad de aguas y sus vertidos, imponiéndose la necesidad del tratamiento de las aguas residuales. Es a partir de 1950 cuando se produce un incremento importante de instalaciones de tratamiento de aguas residuales en los países más desarrollados.

En 1968 se proclama por el Consejo de Europa, en Estrasburgo, la Carta Europea del Agua.

En las últimas décadas, el concepto de desarrollo sostenible y uso eficiente del agua ha llevado al establecimiento de normas de vertido y de reutilización cada vez más estrictas, que conlleva la búsqueda de nuevas tecnologías de tratamiento y regeneración de las aguas residuales.

3. El tratamiento convencional de las aguas residuales

Aunque las aguas residuales contienen una amplia y compleja variedad de sustancias, a efectos de su tratamiento se consideran de interés grupos de sustancias, que se denominan indicadores de contaminación de las aguas residuales, susceptibles

de ser eliminados o reducidos a través de una tecnología específica. Los parámetros típicos de contaminación y sus efectos se presentan en la Tabla 14.1.

El tratamiento convencional de las aguas residuales corresponde a un conjunto de procesos y operaciones que tienen por objetivo la separación de los componentes de contaminación de las aguas. Los procesos pueden ser de tipo físico, químico o biológico.

La separación o eliminación de las sustancias que se encuentran en el agua residual en forma de sólidos en suspensión se lleva a cabo mediante procesos físicos o mecánicos, tales como el desbaste o tamizado, sedimentación, flotación, desarenado, filtración, etc.

Tabla 14.1; Parámetros indicadores de contaminación de las aguas residuales y efectos que producen (Metcalf, 1995)

PARÁMETRO	EFEECTO
Sólidos en suspensión	Desarrollo de depósitos de lodos y de condiciones anaerobias en los puntos de vertido del entorno acuático
Materia orgánica biodegradable	Agotamiento de los recursos naturales del oxígeno disuelto en el agua y al desarrollo de condiciones sépticas en los puntos de vertido del entorno acuático
Materia orgánica refractaria	No se degrada por los métodos convencionales de tratamiento. Puede resultar mediana o altamente tóxica
Sólidos inorgánicos disueltos	Pueden limitar la reutilización de las aguas regeneradas
Metales pesados	Presentan carácter tóxico en la mayoría de los casos
Nutrientes (N y P)	Favorecen el crecimiento no deseado de vida acuática. Provocan la eutrofización de medios acuáticos.
Patógenos	Transmiten enfermedades contagiosas
Contaminantes prioritarios	Compuestos orgánicos o inorgánicos determinados en base a su carcinogenicidad, mutagenicidad o toxicidad conocida o sospechada.

Los procesos de tipo químico se utilizan para la separación o eliminación de sustancias disueltas o de sustancias sólidas en suspensión no separables directamente por procesos físicos. Componentes contaminantes tales como la materia orgánica refractaria, nutrientes como el fósforo, materia en suspensión coloidal, contaminantes prioritarios o los patógenos se pueden eliminar mediante procesos químicos o procesos combinados físico-químicos.

Los procesos biológicos son adecuados para la eliminación de la materia orgánica biodegradable disuelta y/o en estado coloidal presente en las aguas residuales, así como para la eliminación de nutrientes, especialmente el nitrógeno. Los procesos biológicos hacen uso de microorganismos para degradar la materia orgánica disuelta transformándola en productos gaseosos y agua y en biomasa susceptible de separación posterior por métodos físicos.

La operación de tratamiento de las aguas residuales sigue una secuencia en los procesos implicados: tratamiento previo, tratamiento primario, tratamiento secundario, tratamiento terciario o específico y tratamiento de lodos, Figura 14.1.

La primera de las etapas tiene por objeto la separación o eliminación de las sustancias sólidas, de tamaños relativamente grandes, junto a los aceites y grasas presentes en el agua. Se utilizan procesos mecánicos y físicos y al conjunto se le denomina pretratamiento.

La segunda etapa está destinada a separar los sólidos en suspensión de pequeño tamaño que pueden sedimentar a una velocidad apreciable. Es la etapa de sedimentación primaria.

La tercera etapa tiene como función la eliminación de la materia orgánica disuelta en el agua, no separable por métodos físicos tradicionales. Cuando esta materia orgánica disuelta es biodegradable, el proceso de oxidación biológica es el más efectivo y económico, por lo que es el más utilizado en la práctica común.

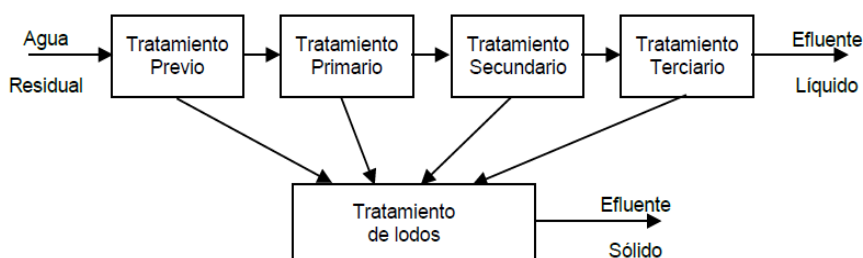


Figura 14.1;Esquema genérico del tratamiento convencional de las aguas residuales domésticas

La reutilización de las aguas residuales tratadas requieren de tratamientos terciarios avanzados, entre los que se incluye la filtración por arena, la desinfección, la desalinización, la micro y ultrafiltración por membranas, y otras.

4. Los reactores biológicos

Los reactores biológicos son los procesos más importantes en el tratamiento de las aguas residuales. Sus objetivos fundamentales son la estabilización de la materia orgánica y la eliminación de sólidos en suspensión en estado coloidal, además de la eliminación de nutrientes, tales como nitrógeno y fósforo de las aguas residuales. A veces son capaces de eliminar componentes tóxicos en concentraciones traza.

En estos procesos se hace uso de la capacidad que tienen diversos microorganismos, fundamentalmente bacterias, para utilizar selectivamente en su metabolismo la gran variedad de compuestos orgánicos no sedimentables que existen en un agua residual y transformarlos en productos de bajo peso molecular (generalmente gases), que demandan menos oxígeno, y en biomasa. Los procesos son, básicamente, los mismos que ocurren en un sistema natural, pero se llevan a cabo en reactores diseñados y contruidos para que se pueda controlar y optimizar su velocidad de eliminación, de modo que la eficacia de una depuración que por vía natural necesitaría días, se reduce a algunas horas.

Los grupos de microorganismos más importantes que intervienen en los procesos biológicos de tratamiento de aguas residuales son:

- Bacterias
- Hongos
- Protozoos y rotíferos
- Algas

Las bacterias constituyen el grupo predominante y el más importante en los reactores biológicos que tratan las aguas residuales.

Los protozoos se suelen alimentar de las bacterias para la obtención de energía; juegan un papel importante en el tratamiento de las aguas residuales.

Los rotíferos aparecen en fases muy avanzadas de la purificación biológica de las aguas. Los hongos intervienen especialmente en el tratamiento de aguas residuales industriales, debido a su capacidad para sobrevivir en condiciones de pH bajos y escasa disponibilidad de nitrógeno.

Las algas juegan un papel importante en las lagunas de estabilización por su capacidad para generar oxígeno por fotosíntesis, utilizado luego por las bacterias en los procesos aerobios.

El diseño y las condiciones de operación de los reactores biológicos se establecen en base a mantener en cada momento el clima óptimo para el crecimiento microbiano, teniendo en cuenta que estos procesos están compuestos por complejas poblaciones microbianas mezcladas e interrelacionadas, en las que cada microorganismo tiene su propia curva de crecimiento. La forma y la posición de cada curva en el tiempo depende del alimento y de los nutrientes disponibles, además de los factores ambientales, tales como pH, temperatura, carácter aerobio o anaerobio del sistema, etc. La evolución en el tiempo de los diversos microorganismos que intervienen en el proceso biológico aerobio de estabilización de la materia orgánica, presente en las aguas residuales, sigue pautas análogas en cuanto a distribución de especies (Metcalf, 1995), Figura 14.2.

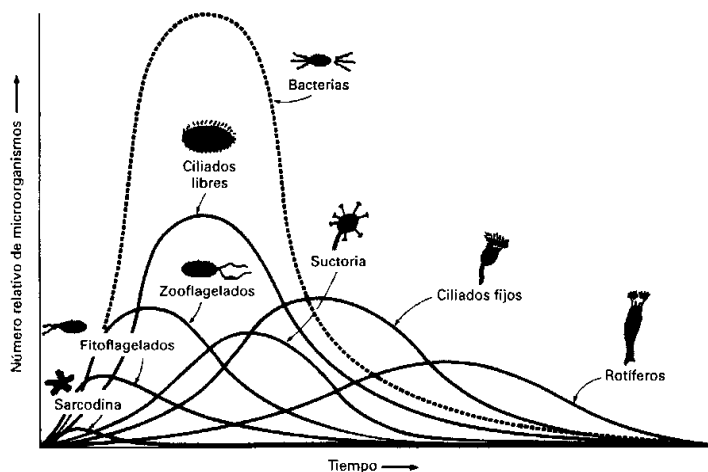


Figura 14.2.; Crecimiento relativo de microorganismos en un medio líquido (Metcalf, 1995)

Debe tenerse en cuenta que un organismo necesita para poder reproducirse y ejercer sus funciones vitales de manera correcta:

- Una fuente de energía.
- Carbono para la síntesis de materia celular nueva.

- Elementos inorgánicos (nutrientes) tales como nitrógeno, fósforo, azufre, potasio, calcio y magnesio.
- Los nutrientes orgánicos (factores de crecimiento) también pueden ser necesarios para la síntesis celular.

El principal objetivo de la mayoría de los procesos de tratamiento biológico es la reducción del contenido de materia orgánica (DBO carbonosa) del agua residual. Para conseguir este objetivo, son de gran importancia los organismos quimioheterótrofos (organismos que obtienen la energía mediante la oxidación de compuestos orgánicos), pues además de energía y carbono, necesitan compuestos orgánicos.

4.1. Tipos de reactores biológicos

Se pueden utilizar varios criterios para clasificar los reactores biológicos:

- Por el tipo de operación
 - Continuos
 - Discontinuos
- Por el tipo de cultivo microbiano
 - Cultivo en suspensión
 - Cultivo fijo
 - Procesos combinados
- Por las condiciones de operación
 - Aerobios
 - Anaerobios
 - Anóxicos
 - Procesos combinados

La operación continua es la más característica en las grandes plantas de tratamiento de aguas residuales. La operación discontinua es típica de tratamientos de aguas residuales con caudales pequeños; para este tipo de operación, el reactor secuencial es el más representativo e interesante.

El cultivo en suspensión es el normalmente utilizado hoy en día, y la configuración más representativa es el reactor biológico de lodos activados. La flora microbiana se encuentra en suspensión, formando flóculos de colonias microbianas en el agua residual a tratar, con agitación y aireación para conseguir condiciones aerobias.

El cultivo fijo implica la formación de una película biológica sobre una superficie, a la cual se difunden el sustrato, los nutrientes y el oxígeno desde la interfase en contacto con el agua residual. Esta película biológica, dinámica, tiene la misma función que el cultivo en suspensión.

Las condiciones aerobias son aquellas que tienen lugar en presencia de oxígeno disuelto.

Las condiciones anaerobias se dan en ausencia de oxígeno disuelto.

Las condiciones anóxicas se dan en ausencia de oxígeno disuelto pero en presencia de nitritos o nitratos.

4.2. El proceso de lodos activados

El proceso de lodos activados es el más empleado en el tratamiento secundario de las aguas residuales domésticas. Su nombre proviene del hecho de que parte del lodo que contiene microorganismos vivos o activos es devuelto al reactor para aumentar la biomasa disponible y la velocidad de las reacciones bioquímicas implicadas.

El reactor de mezcla ideal con sedimentación y recirculación de lodos suele tomarse como ejemplo del proceso de lodos activados por ser el más frecuentemente utilizado, Figura 14.3.

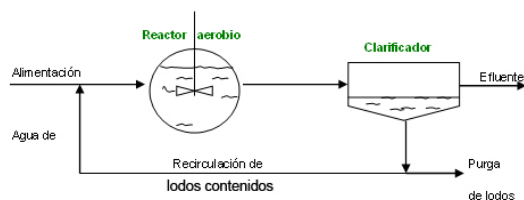


Figura 14.3; Diagrama de flujo del proceso convencional de lodos activados

Oxidación



Síntesis



Respiración endógena



El residuo orgánico se introduce en el reactor, donde se mantiene un cultivo bacteriano aerobio en suspensión. El contenido del reactor se conoce con el nombre de “líquido de mezcla”. En el reactor, el cultivo bacteriano lleva a cabo la conversión en concordancia general con la estequiometría de los tres mecanismos siguientes:

En estas ecuaciones, COHNS representa la materia orgánica del agua residual. A pesar de que la reacción de la respiración endógena conduce a la formación de productos finales relativamente sencillos y al desprendimiento de energía, también se forman algunos productos orgánicos estables.

El ambiente aerobio en el reactor se consigue mediante el uso de difusores o de aireadores mecánicos, que también sirven para mantener la suspensión microbiana en estado de mezcla completa. Al cabo de un periodo determinado de tiempo, la suspensión microbiana se conduce hasta un tanque de sedimentación para su separación de la biomasa del agua residual tratada. Una parte de la biomasa sedimentada se recircula para mantener en el reactor la concentración deseada, mientras que la otra parte se purga del sistema.

En este proceso interviene una flora bacteriana compleja, con géneros diversos tales como pseudomonas, zoogloea, achromobacter, nocardia, algunas bacterias nitrificantes tales como nitrosomonas y nitrobacter, además de algunas formas filamentosas.

Si bien las bacterias son los microorganismos que degradan la materia orgánica (sustrato principal a eliminar) las actividades metabólicas de otros microorganismos

son igualmente importantes en el proceso de lodos activados. Así, los protozoos y rotíferos ejercen una acción de refinado de los efluentes; los protozoos consumen las bacterias dispersas que no han floculado y los rotíferos consumen cualquier partícula biológica pequeña que no haya sedimentado.

Por otra parte, si bien es importante la velocidad con la que se degrada la materia orgánica, también lo es que el cultivo bacteriano en suspensión sea fácilmente separable del líquido que lo contiene. La concentración de bacterias y sus condiciones ambientales ejercen una gran influencia en la sedimentabilidad de los flóculos bacterianos. En el sistema acoplado reactor-sedimentador, las condiciones del primero restringen el comportamiento del segundo.

Las variables de diseño y operación más importantes en el proceso de lodos activados son las siguientes:

- El tiempo de residencia hidráulico, que relaciona el volumen del reactor con el caudal de alimentación.
- El tiempo de residencia celular o edad de lodos, que relaciona la cantidad de biomasa existente en el reactor con la biomasa extraída del sistema como purga.
- La concentración de oxígeno disuelto en el agua contenida en el reactor.
- La temperatura de operación.
- La relación entre la cantidad de sustrato (materia orgánica) alimentado y la cantidad de biomasa disponible en reactor (carga másica).
- Otras.

5. Depuración y Regeneración

Los procesos de depuración de aguas residuales se diseñan para conseguir efluentes que cumplan con las calidades exigidas para el vertido, sin daños a la salud ni al medio ambiente. Sin embargo, la regeneración de las aguas residuales implica obtener efluentes de calidad superior a las depuradas, de forma que puedan ser reutilizadas de acuerdo con las normativas de calidad más exigentes.

El tipo y secuencia de los tratamientos a que se someten las aguas afecta a su calidad. La potabilización de las aguas naturales incrementan su calidad original; los tratamientos de depuración de las aguas residuales producen efluentes de calidad relativamente inferior a la de las aguas naturales; sin embargo, los procesos de regeneración dan lugar a un intervalo amplio de calidades finales. Los tratamientos avanzados son capaces de convertir un agua residual en agua regenerada con calidad potable.

Los avances tecnológicos de los últimos años en los procesos de tratamiento de las aguas residuales han conseguido aumentar, de forma significativa, la capacidad de los países para producir aguas regeneradas, de calidad aceptable y a costes moderados, que pueden servir como alternativa para contribuir a paliar la escasez de los recursos naturales de agua, especialmente en aquellos países con alto desequilibrio del balance hídrico.

6. Las nuevas tecnologías: reactores biológicos de membranas (RBM)

Las normativas sobre calidad de los vertidos a masas acuáticas, cauces y ríos, especialmente en zonas declaradas como sensibles, son cada vez más exigentes, lo que ha llevado a sustituir el término tratamiento de depuración por el de regeneración de las aguas residuales, de forma que los procesos aplicados sean capaces de proporcionar efluentes de calidad de agua prácticamente equivalente a la que tenía antes de su uso.

Para conseguir esa calidad es necesario aplicar tecnologías más sofisticadas y más caras que las utilizadas en los procesos convencionales.

Las tecnologías emergentes de mayor éxito en el mercado internacional, para la regeneración de aguas residuales, hace uso de membranas de ultrafiltración en combinación con el proceso biológico de lodos activados, dando lugar a la denominación de Reactores Biológicos de Membranas (RBM), Figura 14.4.

Un RBM es esencialmente un proceso de lodos activados en el que se ha sustituido el sedimentador de separación de biomasa (clarificador) por un sistema de filtración por membranas de ultrafiltración, que actúa de barrera total frente a sólidos en suspensión (incluye bacterias y gran parte de virus). La mayoría de los RBM actuales tienen las membranas de ultrafiltración sumergidas en el reactor, en contacto con la biomasa bacteriana en suspensión.

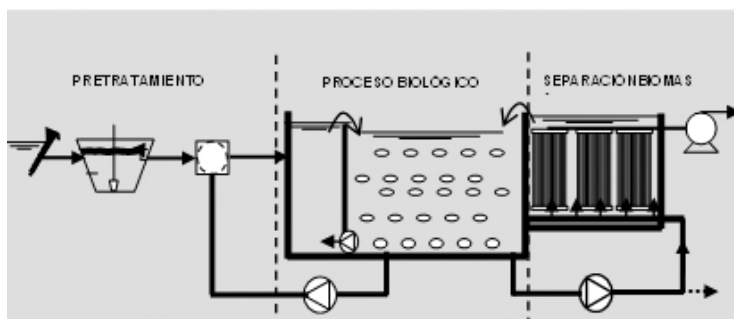


Figura 14.4. Diagrama básico de un reactor biológico de membranas sumergidas

El agua ultrafiltrada, denominada permeado, constituye el agua tratada, mientras el rechazo de la membrana (biomasa) queda en el reactor, agitado por aire, formando el líquido mezcla. Una vez alcanzada la concentración de biomasa deseada en el reactor se extrae una corriente de lodos concentrados para mantener régimen estacionario en la operación.

Las membranas de ultrafiltración utilizadas comúnmente en los RBM son de dos tipos básicos: planas y de fibra hueca, siendo estas últimas las más frecuentes. Necesitan un ligero vacío para conseguir la filtración, que se hace generalmente en el sentido del exterior al interior de la fibra. A medida que se extrae el permeado, la fibra aumenta su resistencia al paso de líquido debido a su ensuciamiento, por lo cual, para mantener el caudal de permeado es necesario aumentar el vacío hasta alcanzar el límite mecánico que soporta la propia membrana.

Para reducir la velocidad de ensuciamiento de la membrana, y con ello aumentar su vida operativa, se recurre a procesos de limpieza mecánica periódica a través de un lavado con permeado por inversión de flujo (retrolavado) durante cortos periodos de tiempo. De esta forma se elimina la capa externa de ensuciamiento de las fibras y parte de las partículas que se han introducido en sus poros. Por otra parte, cada cierto tiempo es necesario realizar una limpieza de tipo químico para recuperar el estado inicial de la membrana.

Con objeto de provocar alta turbulencia en las proximidades a la superficie filtrante externa de las membranas, y reducir así la velocidad de ensuciamiento, se introduce por el fondo de cada módulo de membranas un flujo de aire en forma de burbujas gruesas, en régimen continuo o intermitente.

En los RBM no se da el problema de la sedimentabilidad de la biomasa que se daba en el clarificador de lodos activados convencional. Por ello, en los RBM se puede utilizar en el reactor una concentración alta de biomasa, lo que hace que el sistema resulte más compacto y efectivo en la eliminación de sustrato. Sin embargo, tal concentración no puede ser excesivamente alta debido a problemas de diversa índole, tales como la limitación en la transferencia de oxígeno, el incremento de la viscosidad del líquido mezclado, los cambios en los mecanismos de ensuciamiento de las membranas, etc.

Al no existir problemas de sedimentabilidad de la biomasa, en los RBM se puede llevar a cabo el proceso de eliminación de nutrientes (especialmente nitrógeno) por vía biológica en una sola etapa, de forma que incrementando el tiempo de residencia celular en el reactor se consigue eliminar la materia orgánica biodegradable y la nitrificación del nitrógeno amoniacal; la recirculación hacia una zona anóxica permite realizar el proceso de desnitrificación. De esta forma el permeado (agua tratada) estará libre de materia orgánica y de nitrógeno.

Las nuevas tecnologías de membranas se van imponiendo a gran velocidad en el mercado pero sus costes son aún elevados. El problema principal está en el ensuciamiento de las membranas durante la filtración, fenómeno todavía pendiente de resolver definitivamente, pues los mecanismos son muy complejos, especialmente cuando intervienen procesos biológicos acoplados, como en este caso (Judd, S. 2006; 2010).

Los estudios relacionados con la filtrabilidad de la biomasa en membranas de ultrafiltración, en función del grado de nitrificación conseguido en un reactor biológico, o de las características fluidodinámicas del sistema son de suma actualidad, e implican el conocimiento de los mecanismos de ensuciamiento, del comportamiento de los microorganismos en diferentes condiciones de operación, etc.

6.1. El ensuciamiento de las membranas

Para comprender el ensuciamiento de una membrana durante la filtración de una suspensión se debe tener en cuenta que las fibras de ultrafiltración tienen una estructura porosa compleja, Figura 14.5, a través de la cual debe circular el líquido y quedar retenidos los sólidos de la suspensión a filtrar. Las partículas suspendidas, los coloides y las macromoléculas ensucian la membrana reduciendo el flujo de permeado.

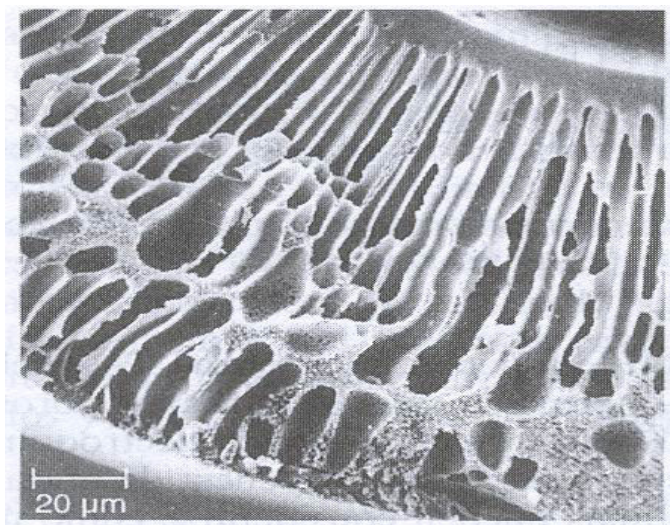


Figura 14.5; Estructura porosa de la pared de una fibra hueca

En el caso particular de la filtración de la biomasa en sistemas de lodos activados, que constituyen la base de los Reactores Biológicos de Membranas, se ha constatado que uno de los factores más importantes del ensuciamiento de las membranas es la presencia de Sustancias Poliméricas Extracelulares (EPS en inglés).

Las EPS son sintetizadas vía natural por los microorganismos, durante su ciclo vital, como respuesta a unas determinadas condiciones de operación, entre las que destacan las condiciones hidrodinámicas, características de la alimentación y limitación de sustrato y oxígeno. El término EPS designa, de forma general, a todas aquellas macromoléculas entre las que se encuentran polisacáridos, proteínas, ácidos nucleicos, (fosfo) lípidos y otras sustancias poliméricas que se encuentran entre los agregados microbianos (Flemming et *al.*, 2001). A pesar de ser distintos los microorganismos productores de las EPS, la composición de la matriz sólo vendrá determinada por los heterótrofos, ya que son éstos los que tienen una velocidad de producción significativamente mayor (Tsuneda et *al.*, 2001) (Le-Clech, et al., 2006).

Las EPS se acumulan en la superficie celular y dan lugar a los aglomerados celulares. Forman una protección frente a las condiciones agresivas del medio y sirven como reserva energética en las condiciones de “hambruna”. Las EPS están formadas principalmente por carbohidratos y proteínas (Sponza, 2002), aunque también se han encontrado sustancias húmicas y pequeñas cantidades de DNA.

Las características de las EPS y su capacidad de ensuciamiento para las membranas cambia con las condiciones de operación del reactor biológico; (J. Cho et al.2005) observan que cuando disminuye el tiempo de residencia celular en un reactor, la cantidad de EPS en la matriz de los flóculos microbianos aumenta, pero a concentraciones de biomasa elevadas, las EPS de la matriz de los flóculos no depende del tiempo de residencia celular. Los mismos autores establecen una relación directa entre el contenido en EPS de la matriz y el ensuciamiento de las membranas.

La mayoría de los estudios recientes relacionados con los mecanismos de ensuciamiento en los sistemas RBM se orientan al papel de las EPS y a la forma de controlar su formación (S. Delgado et al, 2002, 2004, 2005).

6.2. El mercado de RBM

Los sistemas comerciales actuales tienden a la utilización de la configuración sumergida en donde el módulo se introduce directamente en el biorreactor. Aunque existen más de 20 compañías que actualmente comercializan la tecnología, dos son las principales que se imponen en el mercado mundial: GE water&ProcessTechnologies y Kubota, ambas con tecnologías diferentes. El modulo de GE (ZeeWeed® 500 c, d) es de fibra hueca, mientras que Kubota utiliza un modulo de membrana plano (ES, single-deck; EK, double 510). Desde 1995, ambas compañías han experimentado un aumento exponencial en su capacidad instalada, decantándose Kubota por pequeñas instalaciones y GE-Zenon por aquellas de mayor capacidad. Actualmente hay más de 2200 instalaciones (Yang et al. 2005), siendo la mayor planta instalada la de Traverse City (Michigan, EEUU) con una capacidad de 64.000 m³/d y estando en fase de construcción otra planta de 375.000 m³/d en Kuwait.

7. Los reactores biológicos de cultivo fijo: las biopelículas

Las biopelículas son comunidades microbianas compuestas por microorganismos que se adhieren a las superficies gracias a la secreción de EPS, generalmente en forma de filamentos, que se extienden desde las células y forman una matriz o estructura adherente en donde los microorganismos quedan atrapados y comienzan a organizarse en colonias con diferentes requerimientos metabólicos, Figura14.6.

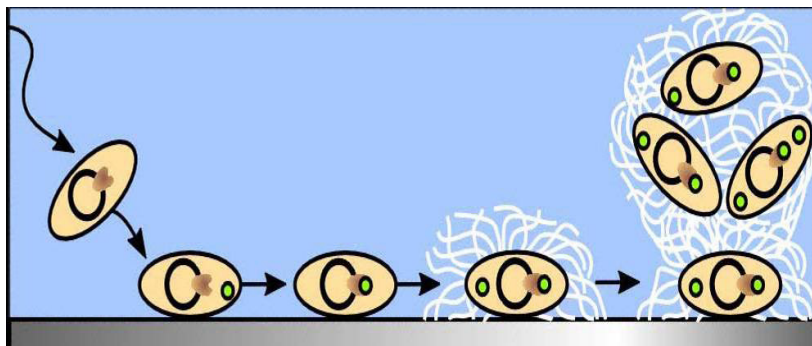


Figura 14.6; Formación de una biopelícula

La biopelícula representa una estrategia de supervivencia, pues proporciona una protección contra las defensas y mecanismos de erradicación microbiana y cuenta con un sistema de canales que le permite establecer un vínculo con el medio externo para hacer intercambio de nutrientes y eliminar metabolitos de desecho.

Estas conformaciones microbianas se caracterizan por su heterogeneidad, diversidad de microambientes, resistencia a antimicrobianos y capacidad de comunicación intercelular que las convierten en complejos difíciles de erradicar de los ambientes donde se establecen. En el hombre las biopelículas se asocian con un gran número de procesos infecciosos que por lo general son de transcurso lento.

Las biopelículas están presentes en la naturaleza y juegan un papel muy importante en la depuración natural de las aguas residuales, en la degradación de las aguas estancadas y en la biorremediación de suelos contaminados.

Están también presentes en muchas instalaciones industriales y su control o su inhibición tiene una repercusión económica importante. En los sistemas de refrigeración, en los cambiadores de calor, en las conducciones de aguas potables y de aguas residuales las biopelículas constituyen un problema de dimensiones importantes.

En otras ocasiones, se buscan las condiciones óptimas para la generación de las biopelículas, como es el caso de los reactores de biodiscos, de lechos percoladores, de lechos sumergidos y de lecho fluidizado, encargados de la depuración de las aguas residuales.

Las biopelículas pueden estar formadas por una sola capa de células o por múltiples capas, alcanzando espesores variables que pueden ir desde algunos mm hasta varios cm, donde conviven microorganismos diferentes, tales como bacterias, hongos y protozoos, dando lugar a la presencia de diferentes microambientes de pH, concentración de oxígeno, concentración de iones, carbono y nitrógeno.

Desde la óptica de la ingeniería y del tratamiento de las aguas residuales, un caso destacable donde la biopelícula juega un papel importante es el transporte de las aguas residuales y de las aguas depuradas a través de tuberías. En el interior de las mismas se genera una biopelícula que incluye microorganismos diversos, partículas y otras materias, que transforma la conducción en un reactor biológico, Figura 14.7.

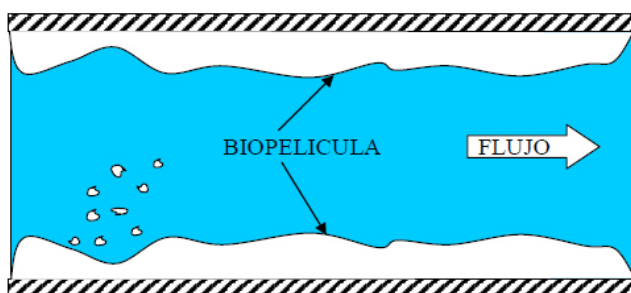


Figura 14.7; Efecto del flujo sobre el crecimiento de la biopelícula

El tipo de proceso que tiene lugar en la tubería depende de las características del agua transportada, pero en general aparecen fenómenos electroquímicos y reacciones asociadas al carácter reductor del medio, puesto de manifiesto por un bajo potencial de oxidación-reducción (negativo) y ausencia de oxígeno disuelto. En estas condiciones, y en presencia de sulfatos, la generación de sulfuro de hidrógeno es una de las reacciones más comunes en estos sistemas.

Las características de las biopelículas que se generan en el interior de las tuberías dependen mucho de la hidrodinámica, pues estas organizaciones se desarrollan en una interfase líquido-sólido donde la velocidad del flujo que lo atraviesa influye en el desprendimiento físico de los microorganismos. Además, poseen un sistema de canales que les permiten el transporte de nutrientes y desechos; esto resulta de vital importancia cuando se piensa en modificar el ambiente que priva a los microorganismos de las moléculas necesarias para su desarrollo.

Las condiciones hidrodinámicas controlan dos parámetros independientes: las fuerzas rasantes y la transferencia de materia. Las fuerzas rasantes determinan el espesor de la película y la transferencia de materia controla el flujo de nutrientes, de oxígeno, de sustrato y de productos derivados del metabolismo celular.

A flujos bajos, especialmente en régimen laminar, la transferencia de materia, tanto en la capa límite hidrodinámica como en la biopelícula, controla el crecimiento microbiano, al mismo tiempo que las fuerzas rasantes son pequeñas y su efecto de erosión y arrastre de la biopelícula es pequeño.

Cuando el flujo se hace turbulento, las fuerzas rasantes tienden a desprender la película, pero al mismo tiempo los efectos de difusión son menores, lo que significa que la reproducción celular será mayor, pues el sustrato y los nutrientes están menos limitados por la transferencia de materia debido a la reducción de la capa límite hidrodinámica y al efecto de mezcla.

Inicialmente se pensó que las biopelículas eran casi planas y homogéneas, pero estudios microscópicos han demostrado su heterogeneidad y su carácter dinámico.

Se ha detectado la presencia de canales internos que permiten el flujo de nutrientes, la existencia de zonas densas y de huecos así como la formación de filamentos en función de las condiciones de flujo.

La presencia de una biopelícula en una tubería tiene gran interés desde la óptica del dimensionamiento. En efecto, la biopelícula representa en primer lugar una reducción del diámetro efectivo de la tubería, lo que reduce su capacidad de transporte, y por otra un cambio en la rugosidad de la superficie interna, lo cual altera los coeficientes de rozamiento, incrementándolos de forma sensible para flujo en régimen turbulento, que es lo normal en el transporte de aguas.

En consecuencia, los ingenieros de diseño de tubería que transportan aguas susceptibles de generar biopelículas con facilidad deberán tener en cuenta estas circunstancias, además del carácter de biorreactor y las posibles consecuencias derivadas de las reacciones que tengan lugar.

Un ejemplo de presencia de biopelícula en tubería lo constituye la conducción de transporte de aguas depuradas en Tenerife. Esta tubería, de 0,60 m de diámetro, conduce el agua depurada desde la estación depuradora de aguas residuales de Santa Cruz de Tenerife hasta el sur de la isla, con un recorrido de unos 60 km. En el interior de esta conducción se ha generado una biopelícula que alcanza espesores

de 0,5 a 1 cm y que tiene como consecuencias dos fenómenos fundamentales: la reducción de la capacidad de transporte de agua, debido a la disminución el diámetro efectivo de la conducción, junto al incremento de la pérdida de carga por rozamiento debido a la biopelícula, y la reacción de generación de sulfuro de hidrógeno como consecuencia de la reducción de sulfatos por efecto microbiano en un ambiente anaerobio.

Se dispone de estudios relativamente extensos sobre la cinética de generación de sulfuros en la citada conducción, el análisis de las variables de influencia y algunos métodos de inhibición de la reacción (S. Delgado et al, 1998; 1999; 2000; 2001; 2004) (L. Rodríguez et al, 2005).

Bibliografía consultada y referencias

- DELGADO-DÍAZ, S.; ALVAREZ, M.; RODRÍGUEZ-GÓMEZ, L.E.; AGUIAR, E., (2000). "Using oxidation reduction potential as septicity control parameter during reclaimed wastewater transportation". *WaterEnvironmentResearch*, 72(4), 455-459.
- DELGADO, S.; ALVAREZ, M.; RODRÍGUEZ-GÓMEZ, L.E.; ELMALEH, S.; AGUIAR, E., (2001). "How partial nitrification could improve reclaimed wastewater transport in long pipes". *Water Science and Technology*, 43 (10), 133-138.
- FLEMMING, H.C.; WINGENDER, J., (2001). "Relevance of microbial extracellular polymeric substances (EPSs)-Part II: Technical aspects". *Water Science and Technology*, 43.
- G. KIELY, (1999). Ingeniería Ambiental. McGraw-Hill.
- J. CHO; K.G. SONG; H.YUN; K.H. AHN; J. KIM; T.H. CHENG, (2005). "Quantitative analysis of biological effect on membrane fouling in submerged membrane bioreactor". *Water Science and Technology*, vol5, No. 6-7, pp. 9-18.
- JUDD, S., (2006). The MBR Book-Principals and Applications of Membrane Bioreactors in Water and Wastewater Treatment. Elsevier, Londres.
- JUDD, S., (2010). The MBR Book-Principals and Applications of Membrane Bioreactors for Water and Wastewater Treatment. (2nd Ed). Elsevier, Londres.
- LE-CLECH, P., CHEN, V., FANE, T.A.G., (2006). "Fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment". *Journal of Membrane Science* 284, 17-53
- L.E. RODRÍGUEZ-GÓMEZ; S. DELGADO; M. ALVAREZ; S. ELMALEH, (2005). "Inhibition of sulphide generation in a reclaimed wastewater pipe by nitrate dosage and denitrification kinetics". *WaterEnvironmentResearch*, 77(2), 193-198.
- METCALF & EDDY. (1995). Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización. McGraw-Hill.
- S. DELGADO; M. ALVAREZ; E. AGUIAR; L.E. RODRÍGUEZ-GÓMEZ, (1998). "Effect of dissolved oxygen in reclaimed wastewater transformation during transportation. Case study: Tenerife (Spain)". *Water Science and Technology*, 37(1), 123-30.
- S. ELMALEH; S. DELGADO; M. ALVAREZ; L.E. RODRÍGUEZ-GÓMEZ; E. AGUIAR, (1998). "Forecasting of H₂S build-up in a reclaimed wastewater pipe". *Water Science and Technology*, 38(10), 241-248.
- S. DELGADO; M. ALVAREZ; E. AGUIAR; L.E. RODRÍGUEZ-GÓMEZ, (1999). "H₂S generation in a reclaimed urban wastewater pipe. Case study: Tenerife (Spain)". *Water Research*, 33(2), 539-547.

- S. DELGADO, F. DÍAZ ; R. VILLARROEL; L. VERA; R. DÍAZ; S. ELMALEH, (2002). "Nitrification in a hollow-fibre membrane bioreactor". *Desalination* 146, 445-44.
- S. DELGADO; F. DÍAZ ; R. VILLARROEL; L. VERA; R. DÍAZ; S. ELMALEH, (2002). "Influence of biologically treated wastewater quality on filtration through a hollow-fibre membrane". *Desalination* 146, 459-462.
- S. DELGADO; F. DÍAZ; L. VERA; R. DÍAZ; S. ELMALEH, (2004). "Modelling hollow-fibre ultrafiltration of biologically treated wastewater with and without gas sparging". *Journal of Membrane Science*, 228, 55-63.
- S. DELGADO; M. ALVAREZ; L.E. RODRÍGUEZ-GÓMEZ; S. ELMALEH, (2004). "Transportation of reclaimed wastewater through a long pipe: inhibition of sulphide production by nitrite from the secondary treatment". *Environmental Technology*, 25(3), 365-372 .
- S. DELGADO; F. DÍAZ; R. VILLARROEL; M.D. GARCÍA; L. VERA; N. REGALADO; E.B. PÉREZ, (2005). "Filtration of biological suspension: membrane performance". *Water Supply*, 5 (3-4), 227-232.
- SPONZA, D., (2002). "Extracellular polymer substances and phycochemical properties of flocs in steady- and unsteady-state activated sludge systems". *Process Biochemistry*, 37.
- TSUNEDA, S., PARK, S., HAYASHI, H., JUNG, J., HIRATA, A., (2001). "Enhancement of nitrifying biofilm formation using selected EPS produced by heterotrophic bacteria". *Water Science and Technology*, 43(6).
- YANG, W., CICEK, N., ILG, J., (2005). "State-of-the-art of membrane bioreactors: worldwide research and commercial applications in North America". *Journal of Membrane Science*, 270, 201-211.

La problemática del flúor en las aguas de la isla de Tenerife. Evaluación del riesgo tóxico

Arturo Hardinsson De La Torre

Carmen Rubio Armendáriz

Ángel Gutiérrez Fernández

Gara Luis González

1. Introducción

El flúor, es un agente químico, a partir de ahora nuestro “Factor de Peligro”, que, a pesar de comportarse como oligoelemento esencial en el organismo humano (está asociado a tejidos como los huesos y el esmalte dental) en exposiciones crónicas excesivas se transforma en un elemento tóxico (Martín-Delgado, et al., 1990b).

Descubierto en 1771, por el químico sueco Carl Wilhelm Scheele, el flúor fue aislado en 1886 por el químico francés Ferdinand Frédéric Henri Moissan (Premio Nobel en 1906). Es un elemento gaseoso halogenado, muy reactivo y tóxico que pertenece al grupo Grupo 17 (o VIIA) de la tabla periódica. Le pertenece la posición 17 en base a su abundancia entre los elementos de la corteza terrestre, presenciándose en el agua del mar, en los ríos y en los manantiales minerales, en los tallos de ciertas hierbas y en los huesos y dientes de los seres vivos (Reimann, et al., 1996; Neal, et al., 2003; Gi Tak, et al., 2006). En la naturaleza se encuentra combinado en forma de fluorita, criolita y apatito.

La toxicidad de este elemento reside en que los iones fluoruros actúan como venenos enzimáticos, inhibiendo la actividad enzimática y, en última instancia, interrumpiendo procesos metabólicos tales como la glucólisis y la síntesis de proteínas

(Camargo, 2003). Estudios recientes relacionan la exposición a altos niveles de flúor a través del agua de bebida con un descenso la secreción de mRNA de insulina desde las células β y con la correspondiente afectación de la tolerancia a la glucosa (García Montalvo, 2009).

El margen de seguridad este elemento, es decir, las dosis a partir de las que el flúor pasa de ser beneficioso a ser tóxico oscilan, según los textos consultados, entre los 20 y los 80 mg/día. La Dosis Letal (DL) del fluoruro sódico se estima en 5 g y la DL de otros compuestos de flúor varía entre 2-10 g, dependiendo de la solubilidad del producto. Ingestas de 32 a 64 mg/Kg de peso son consideradas letales.

La vía principal de exposición del hombre al flúor es la oral/dietética por consumo de agua y alimentos con altos contenidos en F debido, en muchos casos, a contaminaciones ambientales naturales (India, Canarias, México, Pakistán, etc.).

El consumo de agua potable constituye la principal fuente de flúor para el hombre. La legislación actual (REAL DECRETO 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano en España) fija el límite máximo de fluoruro para el agua de abastecimiento público en 1,5 mg/L (valor guía de la OMS) (BOE, 2003). Los niveles de fluoruro en las aguas de bebida son muy variables y dependen del medioambiente (Mandinic, 2009). Numerosos estudios (Luna & Maelina, 2003; Fordyce, et al., 2007) han estudiado las variables geológicas y geográficas relacionadas con los altos niveles de F en el agua de abasto, respectivamente. Además, en las aguas subterráneas, se ha encontrado una correlación positiva entre los fluoruros y el pH y una relación negativa entre los fluoruros con los bicarbonatos (Salve, et al., 2008). El suelo volcánico de carácter poroso y permeable en Canarias hace que una considerable fracción del agua procedente de la lluvia se infiltre en el subsuelo, siendo en este tipo de suelos volcánicos donde se encuentran los mayores niveles de flúor (Camargo, 2003). Es por ello que, para la isla de Tenerife, la bibliografía recoge datos históricos de concentración de flúor en agua de abastecimiento público muy superiores a las permitidas por la legislación. Las galerías tinerfeñas, especialmente la galería del Barranco de Vergara, transportan agua fluorada en exceso fruto de esta contaminación ambiental natural. En Canarias la concentración de flúor considerada como óptima, en función de la media de las temperaturas máximas anuales, es de 0,9 mg/l. Sin embargo, la complejidad de los sistemas de abastecimiento de agua potable en Canarias hace que las concentraciones de flúor sean muy variables entre los distintos términos municipales. Además, el porcentaje de agua tratada en cada municipio es variable lo que justifica las diferencias en los picos de concentración que habitualmente son detectados dentro de un mismo término municipal.

El agua contiene fluoruro libre, molécula que presenta una mejor absorción (casi del 100%) que el flúor combinado con proteínas o el F presente en otros alimentos. Si existe ingestión simultánea de alimentos, este porcentaje de absorción varía, situándose entre el 50 y el 80%. El té y el pescado de mar (consumido con espinas) son fuentes dietéticas relevantes de F (Shomar, et al., 2004; Yi& Cao, 2008). El té, la paste de dientes, el tabaco y el pan masala presentan concentraciones de 3.88-137.09, 53.5-338.5, 28.0-113.0 $\mu\text{g F/g}$, respectivamente (Yadav, et al., 2007). A pesar de que existen pocos estudios sobre el resto de los grupos de alimentos que constituyen la alimentación también, todos los alimentos contribuyen a la ingesta total (Kjellevoid, et al., 1997). También se sabe que en el proceso de elaboración de los alimentos la concentración de flúor puede verse incrementada. En la bibliografía aparecen pocos estudios de estimación de la ingesta total de F (Ponikvar, et al., 2007).

En Canarias se han analizado vinos (Pérez-Olmos, et al., 1990; Rodríguez- Gómez, et al., 2003; Rodríguez, et al., 2005), cervezas y bebidas refrescantes (Martín et al., 1992), aguas de bebidas envasadas (Hardisson, et al., 2001) y se ha puesto a punto metodologías analíticas para diferentes tipos de bebidas (Martín, et al., 1991; Martín, et al., 1993). Asimismo, se han recopilado datos sobre el contenido en flúor en alimentos (Hardisson& Reyes, 2003). En todos estos trabajos, los contenidos de fluoruros encontrados han sido bajos y su aporte dietético no constituye problema alguno.

Tras su ingesta y absorción, el paso del F a través de las membranas biológicas es un proceso pH dependiente por lo que se detecta una rápida difusión del F hacia la sangre. En el estómago, la absorción por difusión pasiva se ve facilitada por la acidez gástrica. La concentración plasmática de flúor (0,14 a 0,19 mg/L) varía dependiendo del equilibrio entre la cantidad ingerida y absorbida y la excretada. Se estima que el 75% del flúor se encuentra en la sangre y el 25% restante se localiza en los hematíes.

El fluoruro absorbido tiene una gran afinidad por los tejidos calcificados, es por ello que el 95% de la cantidad total de flúor presente en el cuerpo humano se encuentra en huesos y dientes. La concentración de flúor en los huesos se incrementa con la edad y es proporcional a la cantidad de flúor ingerida. Los dientes incorporan flúor a lo largo de su maduración. Los tejidos blandos y células tienen concentraciones de flúor relativamente constantes y semejantes a las plasmáticas y, por último, los líquidos intersticiales son más ricos en flúor que los intracelulares. La placenta, al menos en el ser humano, se comporta como una barrera limitante para la difusión de los iones fluoruro hacia el embrión o el feto. Sólo un 20% del flúor en el plasma de la madre es capaz de atravesarla.

El metabolismo del flúor está relacionado con el de la oxiglucosa (FDG), bloqueando el metabolismo celular, inhibiendo la glucólisis, interfiriendo en el metabolismo del calcio y alterando la conducción del impulso nervioso. La excreción depende de la ingesta y destaca la vía renal pH dependiente. Así, la acidificación de la orina, aumenta la reabsorción y reduce la eliminación y la alcalinización de la orina, reduce la reabsorción e incrementa la eliminación. También se excreta flúor a través del sudor y las heces, aunque ambas vías están muy limitadas por numerosos factores, suponiendo un 10% del total del flúor ingerido.

Los valores de IDR (Ingesta Diaria Recomendada) de este ión se presentan en diferentes categorías en función de la edad, el sexo, la situación fisiológica. La ingesta segura y adecuada de fluoruro para los hombres es de 4 mg/p/día y para las mujeres de 3mg/p/día. Para los infantes durante el primer año de vida el intervalo seguro está comprendido entre 0,01-0,5 mg/p/día. Para los niños de dos y tres años se considera la IDR de 0,7 mg/p/día y para los adolescentes las IDR presentan un intervalo recomendado de 2-3 mg/p/día (IMO, 2004).

Los efectos beneficiosos de las ingestas recomendadas de flúor se relacionan con la reducción de las caries. Los iones fluoruro sustituyen los iones hidroxilo en el esmalte en desarrollo antes de que brote el diente, formándose así un cristal de fluorapatita menos susceptible a la solubilización por ácido y, por tanto, más resistente a la formación de caries. Por ello, el flúor, en forma de iones fluoruro o combinado con otros compuestos, se emplea con fines terapéuticos y profilácticos especialmente en la prevención de la caries dental mediante el empleo tópico de pastas dentales, colutorios fluorados y sedas dentales.

La concentración mínima requerida en las aguas de abasto para conseguir una reducción de la caries dental es 1 mg/L (Hardisson& Reyes, 1986; Martín-Delgado, et al., 1990a), es por ello que a concentraciones inferiores a 1 mg/L se recomienda el uso de suplementos fluorados. Muchos trabajos han demostrado que la fluoración del agua potable en zonas donde las concentraciones naturales eran bajas, proporcionaba un método práctico, eficaz y económico para reducir la incidencia de caries dental (Gómez, et al., 1987; Gómez-Santos, et al., 2008); ampliando su aplicación a otras bebidas como zumos, leches y otros alimentos (sal yodo-fluorada).

Sin embargo, el uso creciente que la industria hace de los compuestos de F y la implantación de la fluoración de las aguas hace que el grado de exposición de los seres humanos sea cada vez mayor (Martín-Delgado, et al., 1990b). Por todo ello,

existen numerosas publicaciones que evalúan la exposición crónica a este elemento y supervisan los efectos tóxicos derivados de ella. Mientras el grupo de Oruc ha estudiado la contaminación de las aguas en Turquía (Oruc, 2008), el grupo de Hurtado ha analizado el F en las aguas de México (Hurtado & Gardea-Torresdey, 2004). Ramamohana et al., 1993 y Jha et al., 2009 han publicado los niveles de F en las aguas de la India y Khan et al., 2004 han analizado la presencia de F en las aguas de Pakistán. Czarnowski et al., 1996 relacionaron los niveles de F en el agua de bebida con los niveles urinarios excretados por la población Polaca y, más recientemente, Indermitte et al., 2009 destacan que el 4% de la población de Estonia presenta exposición excesiva a fluoruro y correlacionan los niveles naturales de fluoruro en las aguas (0,01-7,20 mg/L) con la prevalencia de fluorosis dental.

Concretamente, la exposición a altos niveles de flúor se asocia a la iniciación y progresión de la fluorosis dental (García-Montalvo, et al., 2009) y a la aparición de fluorosis esquelética.

La etiología de la fluorosis dental se relaciona con una hipomineralización del esmalte. Cuando la ingesta total de este elemento supera ciertos valores, se producen en el esmalte dental reacciones adicionales que dan lugar a la formación de fluoruro cálcico:



Esta reacción precede a la descomposición de la fase mineral de los dientes que se relaciona con las alteraciones asociadas a la fluorosis dental. Su manifestación comienza con pequeñas manchas opacas de color blanco pergamino que cubren una mínima superficie del diente pero pronto, dichas manchas, adquieren una tinción marrón negruzca formando poros que dan al diente aspecto de deterioro y corrosión. En el hombre, el desarrollo de fluorosis en la dentición permanente está asociado al consumo habitual de agua con cantidades excesivas de flúor durante los primeros cinco a ocho años de vida, cuando las coronas de las piezas dentarias están en plena calcificación (Figura 15.1).



Figura 15.1; Dientes moteados

Son varios los estudios epidemiológicos que indican que la fluorosis dental pasa a ser un problema de salud pública cuando el contenido en flúor del agua potable supera los 2 mg/L. En el caso de la India, aproximadamente 62 millones de personas, incluyendo 6 millones de niños, sufren fluorosis debido al consumo de agua con altas concentraciones de fluoruros, variando la concentración entre 0,94 y 2,81 mg/L (Salve, et al., 2008). En este país, la relación causa efecto entre los niveles de F en el agua y la fluorosis dental ha sido investigada por Yadav, et al., 2009. En China, 38 millones de personas sufren fluorosis dental y 1,7 millones sufren fluorosis ósea grave (Zhu, et al., 2006). Soto-Rojas, et al., 2004 estudiaron la prevalencia de la fluorosis dental en México. En Tanzania los niveles de F que contaminan las aguas de abastecimiento han sido relacionados con los casos de fluorosis dental severa por Yoder, et al., 1998.

En la isla de Tenerife, el municipio de La Guancha ha presentado tradicionalmente concentraciones de iones fluoruro en el agua de abasto superiores a 2,7 mg/L, es por ello que este municipio es considerado como zona de fluorosis endémica desde 1976 (Reyes, 1976). Fernández-Caldas & Pérez-García (1974) llegaron a detectar niveles de 6,4 mg/L en las aguas de abasto de este término municipal.

Además, en 1968 se llevó a cabo un estudio de la prevalencia de la fluorosis dental entre los estudiantes de S/C de Tenerife. 13364 estudiantes fueron examinados por Gómez, et al., 1987. La prevalencia de esta patología llevó a este grupo de investigadores a repetir el estudio entre los años 1991 y 2006 (Gómez-Santos, et al., 2008) en niños de 7 a 12 años observando que sólo el 78.5% de los niños de 12 años estudiados en 2006 resultaban estar exentos de fluorosis dental.

El interés por la salud pública de la población expuesta a estos altos niveles de flúor llevó al grupo de Falcón-Florido, et al., 1987a; 1987b, a realizar estudios sobre el resto de municipios de esta isla canaria. Rodríguez, et al., 1995 y Hardisson (1996) corroboraron los altos niveles de F en las aguas de Tenerife. Concretamente, se detectaron 0,35-6,94 mg/L en el municipio de Icod de Vinos, 2,08-3,12 mg/L en el municipio de San Juan de la Rambla y 2,88-6,20 mg/L en el término municipal de La Guancha. En 2001, estos tres municipios fueron sometidos a una nueva reevaluación observándose una media de 4,22 mg de F/L (Hardisson, et al., 2001).

Teniendo en cuenta que la normativa vigente, sitúa entre 1,5 y 4 mg F/L rango en el cual está desaconsejado el consumo de agua por niños de hasta ocho años, debido al riesgo de, en el caso de un consumo prolongado, sufrir fluorosis dental, el 26 de septiembre de 2006 el Servicio Canario de Salud, mediante un comunicado oficial, enumeró 11 municipios de la isla de Tenerife donde los niveles de F en el agua superaban los límites establecidos por la legislación y recomendaba la restricción del consumo del agua de abasto público a los niños menores de 8 años empadronados en estos términos municipales. Asimismo, y debido a los elevados niveles de F observados (superiores a 4 mg/L) en algunos barrios de los municipios de Adeje e Icod, la restricción del consumo se extendió a toda la población (Servicio Canario de Salud, 2007).

Posteriormente, en enero de 2007, la Dirección General de Salud Pública del Servicio Canario de Salud, extendió la restricción del consumo a los términos municipales de San Cristóbal de La Laguna y Tacoronte debido a la presencia de niveles de F superiores a 2,2 mg/L. Posteriormente, se restringió el consumo de agua a menores de ocho años en 8 barrios del municipio de San Cristóbal de La Laguna (Diario de avisos, 7 febrero de 2008) debido al mantenimiento de unos valores medios de ión fluoruro de 2,1 miligramos por litro (mg/L). En la misma situación fueron encontrados algunos barrios de la capital de la isla tinerfeña, Santa Cruz, donde el depósito suministrador alcanzó niveles de 1,7 mg/L (Diario de aviso, 9 febrero de 2008).

Existen numerosos tratamientos que minimizan la presencia de este contaminante natural en las aguas de abasto (Meenakshi, 2006). Sin embargo, en Tenerife, la gestión de este riesgo ha llevado a las autoridades locales a elegir plantas de tratamiento de las aguas de abasto basadas en la electrodiálisis reversible tanto en el Norte (Icod y La Guancha) como en el Sur de la Isla (Guía de Isora, Santiago del Teide) con el objetivo de reducir los niveles finales de este contaminante natural.

La Fluorosis esquelética anquilosante o incapacitante es el estadio avanzado de la intoxicación crónica por flúor. Se deriva de ingestiones entre 10-25 mg/día de flúor

durante 10 a 20 años, manifestando hipermineralización progresiva de los huesos, especialmente de la columna vertebral y pelvis, calcificación de los tendones y ligamentos y formación de exostosis, dolores articulares y fracturas espontáneas. Se ha observado únicamente en trabajadores en contacto directo con espato de flúor o criolita y en zonas con aguas de consumo público con niveles de concentración de flúor de más de 20 mg/L.

La intoxicación aguda con F es bastante rara y se relaciona con la adición accidental de cantidades excesivas de agua potable en las plantas de fluoración, el uso inadecuado en clínicas dentales, la ingestión masiva casual y con casos de pacientes hemodializados en hospitales ubicados en zonas donde se lleva a cabo la fluoración del agua de suministro.

2. Análisis del riesgo

La protección de la salud de los consumidores y el mantenimiento de la confianza de los mismos en lo que respecta a la Seguridad Alimentaria son los objetivos del libro Blanco sobre Seguridad Alimentaria (Comisión de Las Comunidades Europeas, 2000). Este Libro Blanco establece que el “Análisis del Riesgo” debe ser la base política de la seguridad alimentaria, mediante sus tres componentes; Evaluación del Riesgo (asesoramiento científico y análisis de datos), Gestión del Riesgo (reglamentación y control) y Comunicación del Riesgo.

Teniendo en cuenta que un “Factor de Peligro” es todo agente biológico, químico o físico presente en un alimento o un pienso o toda condición biológica, química o física de un alimento o de un pienso que pueda causar un efecto perjudicial para la salud, dentro del “Análisis del riesgo”, la “Evaluación del riesgo”, es un proceso con fundamento científico formado por cuatro etapas:

- **Identificación del factor de peligro:** Determinación de los agentes biológicos, químicos y físicos que pueden causar efectos nocivos para la salud y que pueden estar presentes en un determinado alimento o grupo de alimentos.
- **Caracterización del factor de peligro:** Evaluación cualitativa y/o cuantitativa de la naturaleza de los efectos nocivos para la salud relacionados con agentes biológicos, químicos y físicos que pueden estar presentes en los alimentos. En el caso de los agentes químicos, hay que realizar una evaluación de la relación dosis-respuesta. En lo que respecta a los agentes biológicos o físicos, hay

que realizar una evaluación de la relación dosis-respuesta, si se dispone de los datos necesarios.

- **Determinación de la exposición:** Evaluación cualitativa y/o cuantitativa de la ingestión probable de agentes biológicos, químicos y físicos a través de los alimentos así como, en caso necesario, de las exposiciones que derivan de otras fuentes.
- **Caracterización del riesgo:** Estimación cualitativa y/o cuantitativa, incluidas las incertidumbres concomitantes, de la probabilidad de que se produzca un efecto nocivo, conocido o potencial, y de su gravedad para la salud de una determinada población, basada en la determinación del peligro, su caracterización y la evaluación de la exposición.

A continuación, pasamos a describir la evaluación del riesgo de la ingesta de flúor presente en las aguas de consumo humano de toda la isla de Tenerife, así como nuestra propuesta de gestión del mismo. Se abordará también la comunicación del riesgo.

3. Evaluación del riesgo

3.1. Identificación del peligro

La identificación y cuantificación de este anión en aguas y en alimentos se lleva a cabo mediante el método potenciométrico del electrodo del ión-selectivo de fluoruro. Si supera los 1,5 mg/L el fluoruro es un compuesto que puede perjudicar la salud a largo plazo. La USEPA permite, sin embargo, un máximo de 4 mg/L, pero advierte que cuando se superan los 2 mg/L la población ha de ser advertida.

3.2. Caracterización del peligro

Como se ha comentado, para los agentes químicos, la caracterización del peligro constituye lo que en Toxicología se conoce como la relación dosis-respuesta.

En la tabla 15.1, se muestra las relaciones entre las concentraciones de flúor encontradas en las aguas y los efectos que producen sobre la salud de poblaciones consumidoras de esta agua.

Tabla 15.1; Relación entre las concentraciones de flúor en las aguas y sus efectos sobre la salud de la población consumidora.

CONCENTRACIÓN, MG F-/L	EFFECTOS SOBRE LA SALUD
< 0,5	Caries dental
0,5-1,0	Mejora la salud dental
1,5-4	Fluorosis dental
> 4	Fluorosis dental y ósea
>10	Fluorosis ósea degenerativa

Puede observarse, como el fluoruro es una sustancia “hormética” (hormetina), ya que a bajas concentraciones faculta un fenómeno carencial (caries dental) y altas concentraciones provoca toxicidad (fluorosis dental y ósea). Entre 0,5-1,0 mg/L constituye un elemento protector de la salud buco-dental.

3.3. Evaluación de la exposición

La evaluación de la exposición se basa en el cálculo de la ingesta diaria estimada (IDE) y su comparación con la ingesta diaria recomendada (IDR). El flúor al ser un oligoelemento esencial no tiene IDA sino IDR. Estas IDR que consideramos son las americanas (BOE, 2003; IMO, 2004).

Las IDR son las siguientes, considerando diferentes edades:

- Adultos:
 - Hombre: 4 mg/p/día.
 - Mujeres: 3 mg/p/día.
- Primer año de vida: 0,01-0,5 mg/p/día.
- Segundo y tercer año de vida: 0,7 mg/p/día.
- Adolescentes: 2-3 mg/p/día.

Como ejemplo, la tabla 18.2 muestra las aguas de la isla de Tenerife con concentraciones superiores a 1,5 mg/L con las correspondientes IDEs (suponiendo un consumo de 2 L de agua al día por persona). Tenerife es una isla que en este momento presenta una clara contaminación natural de sus aguas de abasto por fluoruros, de-

bido a la cesión del anión F⁻ de los materiales volcánicos que están en contacto con las aguas subterráneas.

Tabla 15.2; Municipios de Tenerife con aguas con contenidos en flúor > 1,5 mg/L.

MUNICIPIO	Nº ZONAS DE ABASTECIMIENTO	F ⁻ (MG/L)	IDE (2L/D)
Buenavista del Norte	8	2,79	5,58
Garachico	4	3,00	6,00
La Guancha	1	2,60	5,20
Icod de los Vinos	7	4,70	9,40
La Matanza	3	2,50	5,00
San Juan de la Rambla	5	2,42	4,84
El Sauzal	6	2,32	4,64
El Tanque	4	2,78	5,56
La Victoria	4	1,55	3,10

En la tabla 15.3, se presenta las concentraciones de Tenerife con contenidos inferiores a 1,5 mg F/L.

Tabla 15.3; Municipios de Tenerife con aguas con contenidos en flúor < 1,5 mg/L.

MUNICIPIO	Nº ZONAS DE ABASTECIMIENTO	F ⁻ , mg/L	IDE (2L/d)
Adeje	22	0,77	1,54
Arafo	3	0,53	1,06
Arico	12	0,94	1,88
Arona	8	0,78	1,56
Candelaria	11	0,67	1,34
Fasnia	3	1,20	2,40
Granadilla	12	1,03	2,06
Guía de Isora	7	0,79	1,58
Güímar	10	0,78	1,56
San Cristóbal de La Laguna	20	1,13	2,26
La Orotava	9	0,66	1,32
Puerto de la Cruz	5	1,12	2,24
Los Realejos	6	1,22	2,44
El Rosario	6	0,60	1,20

San Miguel de Abona	7	1,04	2,08
Santa Cruz de Tenerife	29	0,76	1,52
Santa Úrsula	7	0,92	1,84
Santiago del Teide	5	0,92	1,84
Los Silos	5	1,46	2,92
Tacoronte	8	1,35	2,70
Tegueste	6	1,12	2,24
Vilaflor	3	0,50	1,00

3.4. Caracterización del riesgo

“Es la probabilidad que un tóxico genere problemas sobre la salud”.

En este caso, queda claro que una población importante del mundo que bebe agua con altas concentraciones de flúor está expuesta a ingestas que a largo plazo pueden generar fluorosis. La ingesta proveniente de otros alimentos no tiene interés toxicológico alguno.

3.5. Gestión del riesgo

- Recomendar beber agua de bebida envasada a la población. Prioritariamente considerar la población infantil (< de 8 años).
- Procurar encontrar fuentes de aguas con bajos contenidos en fluoruro, para llevar a cabo mezclas que disminuyan la concentración de fluoruro por debajo de 1,5 mg/L.
- En caso de no encontrar fuentes alternativas, se ha de desalar el agua mediante:
 - Plantas de ósmosis inversa.
 - Plantas de electrodiálisis reversa.

3.6. Comunicación del riesgo

- Ha de hacerse de manera rigurosa a nivel municipal, sin alarmar y prestando especial importancia a la población infantil.
- Considerar que si bien puede superarse la CMA, puede no ser superada la IDR.

Ejemplo:

- Aguas con 1,8 mg/L.
- Consumo de 2 L de agua/día.
- IDE = 3,6 mg/día

3,6	<	4 mg
IDE		IDR

Bibliografía consultada y referencias

- BOE (2003). *Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios para la calidad de las aguas destinadas al consumo humano*. (BOE N° 45 de 21 de febrero de 2003, 7228-7245).
- CAMARGO, J.A. (2003). *Fluoridetoxicitytoaquaticorganism: a review*. Chemosphere 50(3): 251-264.
- COMISIÓN DE LAS COMUNIDADES EUROPEAS. (2000). *Libro Blanco sobre Seguridad Alimentaria*. Bruselas.1-61. http://ec.europa.eu/dgs/health_consumer/library/pub06_es.pdf
- CZARNOWSKI, W.; WRZESNIEWSKA, K. y KRECHNIAK, J. (1996). *Fluoride in drinking water and human urine in northern and central Poland*. Sci Total Environ 191(1-2): 177-184.
- FALCÓN FLORIDO, J.T.; HARDISSON, A.; MÁRQUEZ CHAVES, M.; ÁLVAREZ MARANTES, R. y WILDPRET DIXKES, L.M. (1987a). *Recalificación sanitaria da las aguas de abastecimiento público en la isla de Tenerife*. Rev. San Hig Pub 61: 105-115.
- FALCÓN FLORIDO, J.T.; HARDISSON DE LA TORRE, A.; RODRÍGUEZ ÁLVAREZ, C. y SIERRA LÓPEZ, A. (1987B). *Caracteres fisicoquímicos de algunas aguas de bebida envasadas de consumo en Canarias*. Alimentaria Junio: 83-102.
- FERNÁNDEZ-CALDAS, E. y PEREZ- GARCIA, V. (1974). *Características químicas de las aguas subterráneas de las islas Canarias occidentales*. Centro de Edafología y Biología Aplicada de Tenerife (Consejo Superior de Investigaciones Científicas), Aula de Cultura de Tenerife, Santa Cruz de Tenerife: 67-71.

- FORDYCE F.M.; VRANA, K.; ZHOVINSKY, E.; POVOROSNUK, V.; TOTH, G.; HOPE, BC.; ILJINSKY U. y BAKER, J. (2007). *A health risk assessment for fluoride in Central Europe*. Environ Geochem Health 29(2): 83-102.
- GARCÍA-MONTALVO, E.A.; REYES-PÉREZ, H. y DEL RAZO, LM. (2009). *Fluoride exposure impairs glucose tolerance via decreased insulin expression and oxidative stress*. Toxicol 263(2-3): 75-83.
- GI-TAK, C.; SEONG-TAEK, Y.; MAN-JAE, K.; YI-SEGO, K. y BERNHARD, M. (2006). *Batch dissolution of granite and biotite in water: Implication for fluorine geochemistry in groundwater*. Geochem J 40(1): 95-102.
- GÓMEZ, A.; SIERRA, A.; DORESTE, J.; GONZÁLEZ, R.; ÁLVAREZ, R.; HARDISSON, A. y CHISCANO, R. (1987). *Estudio de caries dental en la población de una zona de fluorosis endémica: municipio de la Guancha, Santa Cruz de Tenerife*. Rev San Hig Pub 61(1-2): 63- 77.
- GÓMEZ-SANTOS, G.; GONZÁLEZ-SIERRA, M.A. y VÁZQUEZ-GARCÍA-MACHIÑEÑA, J. (2008). *Evolution of caries and fluorosis in schoolchildren of the Canary Islands (Spain): 1991, 1998, 2006*. Med Oral Patol Oral Cir Bucal 13(9): E599-608.
- HARDISSON DE LA TORRE, A. y REYES JORGE, J.P. (1986). *Estudio de los contenidos en ión fluoruro en dos zonas endémicas de fluorosis dental en las Islas Canarias*. Alimentaria, Noviembre: 43-48.
- HARDISSON, A. (1996). *Estudio de las concentraciones de fluoruro en aguas y vinos de las Islas Canarias. Evaluación de los efectos toxicológicos de su consumo*. Resolución de 26 de agosto de 1996. Boletín Oficial de Canarias (18.9) No. 119 8619-8623.
- HARDISSON, A.; RODRÍGUEZ, M.I.; BURGOS, A.; DÍAZ FLORES, L.; GUTIÉRREZ, R. y VARELA, H. (2001). *Fluoride levels in publicly supplied and bottled drinking water in the island of Tenerife, Spain*. Bull Environ Contam Toxicol 67: 163-170.
- HARDISSON DE LA TORRE, A. y REYES JORGE, J.P. (2003) *Estudio de los contenidos en ion fluoruro en dos zonas endémicas de fluorosis dental en las Islas Canarias*. Alimentaria, Noviembre: 43-48.
- HURTADO, R. y GARDEA-TORRESDEY, J. (2004). *Environmentalevaluation of fluoride in drinkingwater at Los Altos de Jalisco, in the central Mexicoregion*. J Toxicol Environ Health A 67(20-22): 1741-1753.
- IMO (2004). Institute of Medicine, Food and Nutrition Board. *Dietary reference intakes (DRIs): Recommended Intakes for Individuals, Elements*. Washington, DC: National Academy Press.
- INDERMITTE, E.; SAAVA, A. y KARRO, E. (2009). *Exposure to high fluoride drinking water and risk of dental fluorosis in Estonia*. Int J Environ Res Public Health 6(2): 710-721.
- JHA, S.K.; NAYAK, A.K. y SHARMA, Y.K. (2009). *Fluoride occurrence and assessment of exposure dose of fluoride in shallow aquifers of Makur, Unnao district Uttar Pradesh, India*. Environ Monit Assess 156(1-4): 561-566.
- KHAN, A.A.; WHELTON, H. y O'MULLANE, D. (2004). *Determining the optimal concentration of fluoride in drinking water in Pakistan*. Community Dent Oral Epidemiol 32(3): 166-172.
- KJELLEVOLD MALDE, M.; MAAGE, A.; MACHA, E.; JÜLSHAMN, K. y BJØRVATN, K. (1997). *Fluoride content in selected food items from five areas in East Africa*. J Food Compos Anal 10: 233-245.
- LUNA, L.C. y MAELINA, M.G. (2003). *Fluoride in drinking water in Cuba and its association with geological and geographical variables*. Panam Salud Pública 14(5): 341- 349.
- MANDINIC, Z.; CURCIC, M.; ANTONIJEVIC, B.; LEKIC C.P. y CAREVIC, M. (2009). *Relationship between fluoride intake in Serbian children living in two areas with different natural levels of fluorides and occurrence of dental fluorosis*. FoodChemToxicol 47(6): 1080-1084.
- MARTÍN-DELGADO, M.M.; ÁLVAREZ MARANTE, R. y HARDISSON DE LA TORRE, A. (1990a). *La fluoración comunal de las aguas. Procesos y Sistemas*. Tecnología del agua: 74: 55-61.
- MARTÍN-DELGADO, M.M.; ÁLVAREZ MARANTE, R. y HARDISSON DE LA TORRE, A. (1990b). *Revisión de las principales metodologías analíticas para la determinación de fluoruros. Aplicaciones*. Alimentaria Diciembre: 55-62.

- MARTÍN-DELGADO, M.M.; HARDISSON DE LA TORRE, A. y ÁLVAREZ MARANTE, R. (1991). *Determinación potenciométrica de fluoruros en bebidas alcohólicas y analcohólicas. Estudio comparativo de distintas disoluciones acondicionadoras*. An Real Acad Farm 57: 471-483.
- MARTÍN, M.; HARDISSON, A. y ÁLVAREZ, R. (1992). *Fluoride concentration in beers and soft drinks*. J Food Compos Anal 5: 172-180.
- MARTÍN, M.M.; HARDISSON, A. y SIERRA, A. (1993). *Direct potentiometric determination of fluoride in beverages. Comparative study of different buffering solutions*. Food Chem 46: 85-88.
- MEENAKSHI MAHESHWARI, RC. (2006). *Fluoride in drinking water and its removal*. J Hazard Mater B137: 456-463.
- NEAL, C.; NEAL, M.; DAVIES, H. y SMITH, J. (2003) *Fluoride in UK rivers*. Sci Total Environ 314-316: 209-231.
- Oruc, N. (2008). *Occurrence and problems of high fluoride waters in Turkey: an overview*. Environ Geochem Health 30(4): 315-323.
- PÉREZ-OLMOS, R.; HARDISSON, A.; ELLIAS, M.; RIOS, R. y MARTÍN, M. (1990). *Determination of fluoride in Tenerife wines. Comparative study of conditioning solutions*. Belgian J Food Chem and Biotechnol 45(6): 208-213.
- PONIKVAR, M.; STIBILJ, V. y ZEMVA, B. (2007). *Daily dietary intake of fluoride by Slovenian Military based on analysis of total fluorine in total diet samples using fluoride ion selective electrode*. Food Chemistry 103(2): 369-374.
- RAMAMOHANA RAO, N.V.; RAO, N.; RAO, K.S.P. y SCHUILING, R.D. (1993). *FLUORINE DISTRIBUTION IN WATERS OF NALGONDA DISTRICT, ANDHRA PRADESH, INDIA*. ENVIRON GEOL 21 (1-2): 84-89.
- REIMANN, C.; HALL, G.E.M.; SIEWERS, U.; BJORVATN, K.; MORLAND, G.; SKARPHAGEN, H. y STRAND, T. (1996). *Radon, fluoride and 62 elements as determined by ICP-MS in 145 Norwegian hard rock groundwater samples*. Sci Total Environ 192:1-19.
- Reyes, JP. (1976). *Tesina de Licenciatura*. Facultad de Ciencias. Universidad de La Laguna.
- RODRÍGUEZ, M.I.; DE BONIS, A.; LEON, M.C.; HARDISSON, A. y SIERRA, A. (1995). *Estudio de la concentración de fluoruro en aguas de abastecimiento público en tres municipios de la Isla de Tenerife*. XI Jornadas Toxicológicas Españolas y III Congreso Iberoamericano de Toxicología. Puerto de la Cruz. Tenerife, 25-28 de Septiembre.
- RODRÍGUEZ-GÓMEZ, M.I.; HARDISSON DE LA TORRE, A.; BURGOS OJEDA, A.; ÁLVAREZ MARANTE, R. y DÍAZ FLORES, L. (2003). *Fluoride levels in the wines of the Canary Islands (Spain)*. EurFood Res Technol 216(2): 145-149.
- RODRÍGUEZ, M.I.; HARDISSON, A. y BURGOS, A. (2005). *Fluoruro en vinos de denominación de origen de la provincia de Santa Cruz de Tenerife*. Tecnología del vino 26: 58-65.
- SALVE, P.R.; MAURYA, A.; KUMBHARE, P.S.; RAMTEKE, D.S. y WATE, S.R. (2008). *Assessment of groundwater quality with respect to fluoride*. Bull Environ Contam Toxicol 81(3): 289-293.
- Servicio Canario de Salud del Gobierno de Canarias. (2007).
- SHOMAR, B.; MÜLLER, G.; YAHYA, A.; ASKAR, S. y SANSUR, R. (2004). *Fluorides in groundwater, soil and infused black tea and the occurrence on dental fluorosis among school children of the Gaza strip*. J Water Health 2(1): 23-35.
- SOTO-ROJAS, A.E.; URENA-CIRETT, J.L. y MARTINEZ-MIER EDE, L. (2004). *A review of the prevalence of dental fluorosis in Mexico*. Panam Salud Publica 15(1): 9-18.
- YADAV, A.K.; KAUSHIK, C.P.; HARITASH, A.K.; SINGH, B.; RAGHUVANSHI, S.P. y KANSAL, A. (2007). *Determination of exposure and probable ingestion of fluoride through tea, toothpaste, tobacco and pan masala*. J Hazard Mater 142(1-2): 77-80.
- YADAV, J.P.; LATA, S.; KATARIA, S.K. y KUMAR, S. (2009). *Fluoride distribution in groundwater and survey of dental fluorosis among school children in the villages of the Jhajjar District of Haryana, India*. Environ Geochem Health 31(4): 431-438.
- YI, J. y CAO, J. (2008). *Tea and Fluorosis*. J Fluorine Chem 129(2):76-81.

- YODER, K.M.; MABELYA, L.; ROBISON, V.A.; DUNIPACE, A.J.; BRIZENDINE, E.J. y STOOKEY G.K. (1998). *Severe dental fluorosis in a Tanzanian population consuming water with negligible fluoride concentration*. Community Dent Oral Epidemiol 26(6): 382-393.
- ZHU, C.; BAI, G.; LIU, X. y LI, Y. (2006). *Screening high-fluoride and high-arsenic drinking waters and surveying endemic fluorosis and arsenism in Shaanxi province in western China*. Water Res 40(16): 3015-3022.

El aprovechamiento del agua en los agrosistemas tradicionales canarios. Comparación con otros territorios

Juan Carlos Santamarta Cereza
Francisco Suárez Moreno

1. Introducción

Los suelos volcánicos son los más fértiles del mundo si bien, en muchas islas, el factor limitante es la cantidad de agua disponible; en la mayoría de los casos suele ser escasa como en Canarias, Cabo Verde o las islas volcánicas griegas. La relación entre las plantas y el agua en un terreno volcánico es fundamental, ya que uno de los condicionantes para que las plantas puedan desarrollarse correctamente en el medio, son las condiciones ambientales; entre ellas la disponibilidad de agua y la humedad relativa. Estos dos factores, juegan un papel fundamental, por ello, en las islas oceánicas en general y, en Canarias en particular, se han desarrollado unas estrategias con el fin de incrementar en la medida de lo posible, la cantidad de agua para su uso en los cultivos. Además del agua procedente de la lluvia convencional, las estrategias se han orientado al aprovechamiento del agua de procedencia atmosférica (lluvia horizontal), el agua de escorrentía que fluye por las laderas y, por último, el agua y los nutrientes, procedentes de partes altas de las islas, transportados por los

barrancos fruto de fuertes lluvias. La taroz o rocío también aporta una cantidad extra de agua, sobre todo en los barrancos más o menos cerrados o angostos.

Hay que hacer hincapié en que el terreno volcánico, más concretamente los suelos volcánicos, entendiendo estos como aquella parte del mismo donde se pueden desarrollar las plantas, como ya se ha dicho, son los mejores del mundo para su uso agrícola, obviamente una vez que se han dado las circunstancias y condiciones para su formación. Ejemplos se tienen a lo largo de toda la geografía mundial, a las ya comentadas islas Canarias, se le une la isla de Jeju en Corea del Sur y sus famosos cultivos de te verde, o en el pacífico el archipiélago de Hawái con su producción de piña y café Kona.

Aunque la roca volcánica es muy dura y compacta, al meteorizarse, se llegan a crear fisuras que son ocupadas en muy poco espacio de tiempo por la arena volcánica, las raíces se van desarrollando en estas grietas donde es posible tener unas condiciones favorables para el desarrollo vegetal, además, cuando hay lluvias, en estos pequeños huecos se crean unos reservorios de agua para la planta así como una humedad importante.

Otro aspecto que hay que tener en cuenta es que; en algunas regiones o islas, no siempre se va a disponer de lluvias periódicas en cantidad deseable, por lo que las plantas apoyadas por unas estrategias singulares, como por ejemplo los enarenados o arenados (según el autor consultado, se utilizará indistintamente) que también se estudiarán en este capítulo, pueden llegar a aprovechar el agua atmosférica. Esto permite desarrollarse en territorios insulares inhóspitos y con pocos recursos convencionales, ayudándose de los materiales volcánicos.

Las estrategias hidrológicas en los agrosistemas de las Islas Canarias cumplen dos funciones; por un lado incrementar los recursos hídricos —escasos en general— para el uso agrícola y por otro lado; la conservación de los suelos volcánicos, sobre todo los ubicados en las laderas de los barrancos. Es interesante añadir otra función indirecta que es la creación de un paisaje insular único de bancales, gavias y otras estructuras.

Los cultivos agrícolas en Canarias se favorecen por tener un suelo volcánico, el verdadero condicionante de la agricultura en Canarias es la disponibilidad y los precios del agua.

Un primer ciclo tras la Conquista y hasta mediados del siglo XVII fue el de la caña de azúcar para la exportación del producto, complementado con los de subsistencia

de cereales y el millo originario de Américas, hortalizas y frutales diversos. Siguió luego el de los viñedos para la exportación de vinos complementado con los anteriores de subsistencia en los que destacó la papa procedente de América y otros como la barrilla hasta las primeras décadas del siglo XIX que encontró la sustitución, muy rentable pero efímera, de la cochinilla hasta su fracaso a mediados de esta centuria y el ensayo del tabaco y la caña de azúcar. Entre finales del siglo XIX y principios del XX se introducen y se afianzan los nuevos cultivos de exportación de plátanos, tomates y papas complementado con el de subsistencia tradicional (cereales, frutales, hortalizas...) hasta avanzada la segunda mitad de este siglo donde se introducen cultivos alternativos como el de las flores, papayos, piña tropical, aguacates, mangos, que después de 1920 habían venido introduciendo desde América los indios canarios.

Salvo en Lanzarote a día de hoy en Canarias (y en general en las islas volcánicas) la agricultura es el mayor consumidor de recursos hídricos del archipiélago. Este patrón de consumo se reproduce en la zona de la Macaronesia y en otros sistemas insulares oceánicos.

Los lastres de la agricultura en Canarias son variados pero se pueden recopilar de una manera general en los siguientes.

- Territorio limitado.
- Orografía abrupta, dificultad técnica para conseguir zonas de cultivo, necesidad de bancales.
- Abandono del sector agrario.
- Altos costes de producción, siendo el agua un coste muy importante.
- Altos costes de transporte para la exportación.
- Falta de uniformidad en los pagos del producto recolectado.
- Competencia desleal por terceros países.
- En algunos casos dependencia de plantas desaladoras o bien suministro de plantas de reutilización de aguas con calidades variables (picos de salinidad, calidad no uniforme).

- Cambio en general del uso del agua del consumo agrícola al consumo turístico.

La gran diversidad de espacios de cultivos agrícolas por un acusado gradiente altitudinal y variedad climática que nos presentan unas Islas Canarias montañosas y húmedas a Occidente y otras secas y llanas a Oriente, más en cada una de ellas un barlovento húmedo y un sotavento árido, han determinado muchas estrategias y sistemas de cultivo en función de las aguas y de los terrenos. Así tenemos en primer lugar en zonas húmedas los hidrocultivos de las tradicionales *berreras* y *ñameras*; en zonas húmedas y secas el aprovechamiento de laderas de barranco muy desniveladas mediante *bancales* encadenados donde el agua baja a través de tajeas baja de unos a otros; en terrenos llanos o con suaves pendientes de zonas muy secas acotados para embeber las aguas pluviales mediante *gavias*; en los cauces de barrancos y barranqueras seccionándolos con paredes y conformando terreno fértil a veces encadenados y denominados *nateros* o *traveseros*; y, por último, la estrategia de aprovechar y mantener al máximo la humedad recogida en terrenos secos utilizando materiales piroclásticos de los volcanes bien depositados de forma natural por los mismo los *jables* o bien de forma artificial lo que se denomina *arenados*, lo que representa el conjunto de los cuatro últimos sistemas una singular forma sostenible de cultivo agrícola sólo con el agua de la lluvia.

2. Agrosistemas Canarios

2.1. Hidrocultivos: *berreras* y *ñameras*

El cultivo de berros y ñames, desde tiempo inmemorial, se hacía en las zonas húmedas de las Islas, en los espacios naturales de manantiales, charcos y arroyos de aguan continua. El crecimiento de la población originó una mayor demanda de estos productos que aún constituyen materia prima culinaria y a tal efecto se necesitaron espacios de hidrocultivos más amplios. Se recurrió a la técnica de los nateros o traveseros, es decir a seccionar los cauces con muros de piedra seca para conformar charcas artificiales.

Las berreras y su cultivo anexo de ñameras las encontramos sobre todo en Gran Canaria en los barrancos de Azuaje, entre Firgas y Moya o el Valsequillo-San Roque y en el Norte de Tenerife, zona de Anaga. Para ello decíamos que se seccionaban los cauces de los barrancos secundarios con muros de piedra en los se iban conformando pequeñas represas a modo de azudes que encharcaban, en sucesivos escalo-

namientos estos cauces, dentro de las cuales, previo aporte de sedimentos iniciales que con posterioridad se enriquecían con las escorrentías, se generaba un suelo propicio para el cultivo de ñameras y berreras.



Figura 16.1; Bancales en la isla de la Gomera. (Santamarta JC, 2009)

Pero en la segunda mitad del siglo XX la demanda de los berros y ñames fue en aumento que se necesitaron nuevos hidrocultivos, para lo que se acondicionaron espacios en los márgenes de los barrancos, en bancales específicos para que el agua circulara de uno a otros planos para el caso específico de los berros. Los ñames, aunque también son plantas que necesitan mucha agua, se pueden cultivar en laderas dentro de un sistema de riego continuado (Perdomo M., 2000 y Perdomo C., 2006).

2.2. Agrosistemas singulares: bancales, nateros, gavias y arenados

2.2.1. Bancales, terrazas o cadenas

Los *bancales*, *terrazas* o *cadenas* los encontramos en todas las islas, en conjuntos cuya densidad se acentúa en zonas de valles y barrancos con pocos suelos fértiles para regadío. Por su importancia económica y paisajística, son quizás con los pozos, galerías y estanques y acequias las estrategias más extraordinarias que los canarios han desarrollado en su constante dialéctica con la Naturaleza, siendo en La Gomera y en Gran Canaria donde encontramos los conjuntos más singulares. Pero no es un

agrosistema exclusivo de Canarias puesto que las viejas sociedades agrícolas, incluso protohistóricas de América, Asia y Europa, asentadas orografías difíciles se han valido de este sistema para saciar la referida necesidad de “hambre de tierra”.

Para construir estas cadenas se nivela al máximo el terreno enladerado con distribución adecuada de materiales sueltos y tierra con una base susceptible de materiales para un mejor drenaje; luego se levanta un muro con cabezas de piedra seca (en algunos lugares con sillería de mantos volcánicos ignimbríticos) y mampuestos para contención de toda la parcela (*cadena* de tierra) y, por último, se ejecuta la nivelación o rellano final, con el asurcado de la tierra por secciones o machos y la colocación de tageas-riegos. Hay que distinguir unos bancales antiguos en zonas del interior de las islas y otros más modernos contruidos entre finales del siglo XIX y principios del XX para el cultivo de caña dulce y sobre todo para el de plataneras por el norte de Gran Canaria, Tenerife, La Palma y Gomera, sobre todo, que en algunos lugares denominan como “bancales de los ingleses”. También por su arquitectura hay que diferenciar los bancales con rellano plano (en su mayor parte por la zona costera) y los de relleno con suave pendiente (medianías y cumbre). En los acondicionamientos de bancales más modernos o incluso en las mejoras recientes se empleó, con fuertes movimientos de tierra de unos lugares a otros, tanto materiales fértiles de otros puntos como picones volcánicos (que no lapilli) para mejorar el suelo.



Figura 16.2; Bancales y arenados en Lanzarote. (Santamarta JC, 2009)

En los últimos tiempos el abandono de la agricultura ha propiciado un acusado deterioro de las terrazas canarias a lo que se ha respondido con proyectos de conservación, estudio y difusión como bien patrimonial, caso por ejemplo del Proyecto de Interreg Terrisc.S-O2.1 E.6. *Recuperación de paisajes con terrazas y prevención de riesgos naturales*. Así como trabajos de investigación por la Universidad de Las Palmas para las terrazas de la Cuenca del Guiniguada (Romero M., *et al*, 2003 y 2006).

2.2.2. Gavias, nateros, traveseros y trancas

Gavias y *nateros* son formaciones antrópicas de terreno agrícola adaptados al aprovechamiento de las aguas pluviales, propios de las regiones áridas y semiáridas; las *gavias* se ubican en terrenos sedimentarios llanos o de suave pendiente y los *nateros* (en algunas zonas denominados *traveseros* o *trancas*) en el cauce de los barrancos previo un seccionamiento del mismo con una pared de piedra para retener los materiales de las escorrentías y generar suelo productivo. De unos y otros hay similitudes por el norte de África, sur de Europa y América. Algunos especialistas los consideran como unas estrategias hidráulicas preexistentes desde la sociedad aborigen y consolidada con la llegada de los colonos europeos después del siglo XV. La mayoría de ellos están hoy abandonados a pesar de que constituyen bienes patrimoniales necesarios de rehabilitación porque, además, de sus valores paisajísticos, ambientales y culturales, son agrosistemas propicios al desarrollo sostenible. Además, ambos sistemas evitan las pérdidas de suelo en las escorrentías, incrementan las reservas de agua al propiciar la infiltración, controlan la salinidad, sirven de reserva ecológica para especies animales y conforman un paisaje histórico que activa el atractivo turístico-cultural (Perdomo M., 2002).

Los *nateros* constituyen un sistema combinado de captación de aguas pluviales para riego y de formación de terreno fértil con los sedimentos de éstas, en los cauces de los barrancos con desniveles algo acusados, cuyo cerramiento se hace mediante muros de piedra de planta recta o bien curva adecuada al nivel de las vaguadas de los barrancos. Se encuentran en casi todas las islas y llevan nombres diversos como *ateros*, *argamasas*, *traveseros* y *trancas*... y son muy semejantes a los *jessour* de Túnez. Su nombre, del portugués *nateiro*, viene dado por la formación de la nata de lodo que se retiene del agua y materiales finos arrastrados en la escorrentía de los barrancos (Perdomo M., 2004). Encontramos muchos *nateros* por las barranqueras secundarias de la red pluvial de Fuerteventura, Lanzarote, Gran Canaria, La Gomera... puesto que en los grandes cauces las grandes avenidas se los llevan. En Lanzarote se les denomina *traveseros* por lo de atravesar los cauces y en La Palma aparecen unas obras similares muy antiguas probablemente de factura indígena perfecciona-

da luego (País *et al*, 2007). El sistema de hidrocultivo de las berreras puede ser considerado como un natero húmedo. A veces varios nateros encadenados en un cauce se amplía hacia las laderas adyacentes y genera un paisaje similar al de los bancales.



Figura 16.3; Muros de gavias en Fuerteventura. (Santamarta JC, 2009)



Figura 16.4; Nateros en el Sur de Tenerife. (Santamarta JC, 2010)

Las *gavias* son espacios de cultivos mayores dimensiones, ahondados o bordeados por camellones o paredes, preparados para una inundación controlada por las aguas pluviales; ubicados en terrenos más llanos o en suaves pendientes. En ellos se aplica la vieja técnica que debió emplearse por la sociedad indígena y por muchos pueblos protohistóricos de clima xérico que se le conoció en nuestras islas como la *resfriada* de la tierra por inundación controlada. Aparecen circundados por un camellón o caballón de tierra, llamado *trastón*, que retiene el agua de lluvia que a la misma se conduce. Esta suele recogerse por un sistema jerarquizado de canalizaciones y penetra en la gavia a través de una *torna* hasta que se llena por completo para, a continuación, por el *desagüe* enviar el agua sobrante a la siguiente gavia. Este sistema agrohidráulico lo encontramos desde los *khadin* y *ahar* de la India a las *cajas de agua* mexicanas, pasando por los *meskat* y *m'goud* de Túnez. Son muy comunes en la isla de Fuerteventura, aunque en menor cantidad las hubo en Lanzarote y en Gran Canaria. Se presentan de varios tipos. Por su ubicación están las *gavias de ladera* o las *gavias de fondos de barranco* (similares a los *nateros* pero diferenciadas de los mismos en la formación del suelo ha sido natural). Y por el sistema de captación de las aguas pluviales se presentan las *gavias de alcogidas*, que reciben el agua de una zona amplia a modo de *impluvium*; las *gavias de derivación* que reciben el agua a través de un complejo sistema de caños o conducciones y las *gavias mixtas*, que combinan la recepción del agua a través de *alcogidas* y de *caños*.

2.2.3. Arenados naturales y artificiales

Esta tipología de cultivos y estrategia singular con respecto a la disponibilidad de agua es típica de las islas de Lanzarote, Tenerife y Gran Canaria, aunque se ven representados en la península Ibérica en la provincia de Almería. A lo largo de la geografía mundial existe otra zona donde se utilizan, en Israel, más concretamente en el desierto del Negev, en esta misma localización, han habido experiencias para utilizar cenizas para la conservación del suelo con ciertos buenos resultados, este nuevo uso no ha sido para aumentar la disponibilidad de agua de la planta sino más bien para evitar la erosión eólica, que como es evidente se puede llegar a formar en un ambiente semidesértico.

Los tipos de enarenado que existen actualmente en el mundo son los siguientes:

- Tipo Lanzarote.
 - Natural.
 - Lapilli negro (10-12 m).
 - Jable (arena volada).
- Artificial.
 - Capa de estiércol (10 cm).
 - Capa de arcilla (15 cm).
- Tipo Tenerife.
 - Natural.
 - Zahorra.
- Artificial.
 - Jable (piedra pómez).
 - Capa de estiércol. (2 cm).
 - Capa de fertilizantes (5-10 cm).
 - Capa de cobertera (30-60 cm) jable procedente de canteras.
- Tipo Almería.
 - Artificial.
 - Materiales silíceos.
- Tipo Israelí.
 - Artificial.
 - Materiales silíceos.



Figura 16.5; Arenado tipo Jable en Tenerife (Santamarta JC, 2009)

El enarenado se puede definir como una capa de material volcánico de tipo granular con suficiente número de poros como para suministrar y conservar, una cantidad suficiente de agua atmosférica que favorezca el desarrollo de un cultivo. Esta definición puede tener muchas matizaciones en el sentido de la procedencia y tipo de material utilizado así como del uso o no de estiércol para aumentar la producción, modalidad que se utiliza en Almería.

Cuando la superficie de lapilli ha sido cubierta por la propia naturaleza, por las erupciones volcánicas arrojando cenizas, se habla entonces de *enarenados naturales*. Otros agricultores traían *picón* desde algún yacimiento cercano al terreno junto a su casa, para cultivar sus plantaciones y vigilar las cosechas.

Este sistema puede mantener la humedad hasta un año después de una lluvia con unos rendimientos agrarios similares a los del regadío, en precipitaciones que apenas superan los 100 mm anuales, también tienen otra función que es la conservación de suelos, evita su pérdida tras lluvias. Los enarenados artificiales tienen escasa vida (15-20 años), se deben mantener y realizar labores agrícolas continuas.

El sistema de funcionamiento de esta estrategia hidrológica es como sigue, el lapilli al ser de color negro absorbe intensamente la radiación emitida por el sol, la conductividad térmica media aparente del lapilli es del orden de 0,15 calorías por cm³ y grado, lo cual es un valor bajo y al llegar la noche, el material se enfría rápidamente, lo cual produce conjuntamente con unos valores de humedad relativa del orden de

90-95% a que se forme alrededor vapor de agua atmosférico que puede ser utilizado por la planta.

En Canarias, mediante esta estrategia, se han podido desarrollar los siguientes productos (algunos abandonados en la actualidad) vid, cebollas, papas, cochinilla (colorante), tabaco y en menor medida algunas leguminosas.



Figura 16.6: Paisaje de cultivos arenados en La Geria, Lanzarote (Santamarta JC, 2010)

Los primeros cultivos de este tipo se desarrollaron en la zona de La Geria, hace 200 años, en la isla de Lanzarote, son de procedencia “natural” no han sido formados por transporte de material de otras partes de la isla o cantera. Estos enarenados naturales tienen un espesor mayor que los formados artificialmente por los agricultores, el material volcánico utilizado es el piroclasto de color negro, lapilli o picón denominado por los locales. Este lapilli puede superar ampliamente el 60% una densidad real de $2,50 \text{ g cm}^3$ de porosidad total, con un albedo medido al medio día cercano al 10%.

Existe otro piroclasto de color rojo que no se usa, aunque existe en la isla de Lanzarote, cuya razón para no utilizarlo se tiene que ver en un microscopio electrónico, donde se pueden observar que sus poros o huecos están oxidados y taponados, por lo tanto su capacidad de retención hidráulica es mucho menor que la del lapilli de color negro cuyos poros no están oxidados ni colmatados.

En la isla de Tenerife, el material utilizado difiere del comentado para la isla de Lanzarote, en aquella isla se utiliza lo que se denomina coloquialmente “zahorra” o “jable”, el primero está vinculado a cultivos de secano y es de origen natural y el segundo está realizado artificialmente, corresponde al material comúnmente llamado “piedra pómez”.

Tabla 16.1; Procedencia, material utilizado, tipología, cultivos y antigüedad de los enarenados en el mundo.

PROCEDENCIA	MATERIALES Y ESTRATEGIAS UTILIZADOS	TIPOLOGÍA	CULTIVOS	ANTIGÜEDAD APROXIMADA EN AÑOS
Lanzarote	Lapilli negro Jable (arena volada) Incorporación posterior de estiércol (abono) Incorporación de capa impermeable de arcilla	Natural y artificial	Secano	200
Tenerife	Zahorra Jable (piedra pómez) Fertilización en cobertura Capa en cobertura de jable	Zahorra (natural) Jable (artificial)	Secano	200
Andalucía	Materiales silíceos; Arenas , gravas Capa de abono Recuperación de suelos salinos	Artificial	Regadío	100
Israel	Materiales silíceos; Arenas	Artificial	Regadío y secano	60

A las estrategias anteriormente comentadas, es necesario añadir otras técnicas auxiliares para evitar el efecto del viento , en el caso de Lanzarote se ha recurrido a ramas y en tiempos más modernos a bloques construidos de tal forma que se permitía por medio de huecos entre los diferentes bloques el trasiego del aire.

Las mejoras introducidas en esta tipología de cultivo fueron las siguientes, inicialmente fue la introducción de estiércol para la mejora del rendimiento y en enarenados con elevadas potencias se incluyó una capa de arcilla para evitar el filtrado a capas profundas del cultivo perdiéndose por infiltración mucha cantidad de agua.

Las operaciones para ejecutar un enarenado artificial se pueden resumir en las siguientes:

- Selección del terreno.
 - Proximidad de material piroclástico.
 - Cultivos próximos.
 - Disponibilidad de mano de obra.
 - Conexiones por caminos.
- Desbroce del terreno.
- Limpieza del terreno.
 - Retirada piedras y otros elementos.
 - Arado.
- Nivelación del suelo.
- Construcción capas del enarenado.
 - Capa arcillosa.
 - Capa de abono.
 - Capa de lapilli.
 - Plantación mediante ahoyado.

Los mantos de lavas y de materiales sueltos, cenizas o piroclastos (lapilli) de variada granulometría expandidos por la erupción de Timanfaya, en Lanzarote, entre 1730 y 1735 y luego en 1820 destruyó poblados enteros y grandes espacios de cultivo (de León H. 2006). Pero con el transcurso de los años tras apagarse la cadena de volcanes, el campesino de Lanzarote debió observar que las plantas que crecían en las capas de *picón* o *jable* o *arena volcánica*, tenían un desarrollo extraordinariamente favorable sobre todo en tiempos de sequía. Y generó la idea de excavar hoyos en estas capas de cenizas volcánicas hasta encontrar el suelo fértil y realizar allí la plantación, lo que suele denominarse genéricamente arenados aunque los hay de naturaleza diferente.

En el *arenado natural* destacamos primero la estrategia de cavar hoyos de hasta dos metros y rodearlos con un muro de piedras volcánicas para proteger las plantas del viento alisio, transformando con ello una zona árida e improductiva en un extraordinario paisaje de cientos de hoyos donde se cultiva sobre todo viñedos y árboles frutales que alcanza en la zona de La Geria su mejor representación. El otro ejemplo de arenado natural dentro del área volcánica de Timanfaya (pero en zonas más alejadas a los volcanes cuya afección solo fue de capas de ceniza cubrieron

grandes extensiones de terreno fértil que quedaron improductivos) es el que se empleó aligerando la capa de lapilli hasta dejarla con un espesor de 10 a 15 cm, para plantar hortalizas (cebollas, calabazas, sandías...) y otros productos de subsistencia. En algunas zonas, a este arenado natural se lo conoce como *polvillos* por el continuo laboreo que ha sufrido entremezclándose el picón o arena volcánica con la tierra fértil, de lo que cual encontramos grandes extensiones por Fernés, Uga, Tías, Macher, San Bartolomé... Este sistema permite primero enraizar a las plantas más fácilmente en el suelo fértil y un alto rendimiento del agua puesto que la capa superior de lapilli reduce la evapotranspiración y en el caso de los hoyos la pared adicional protege a los cultivos del viento.

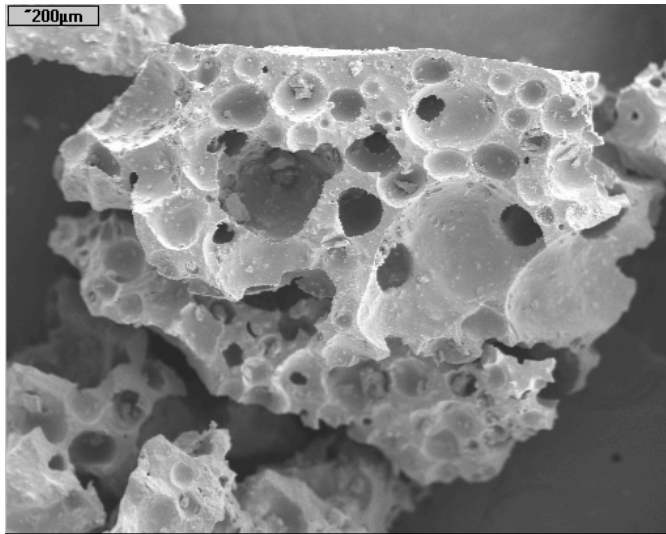


Figura 16.6; Lapilli negro al microscopio electrónico, se pueden observar el volumen de huecos para mantener la humedad. (Laboratorio de la Calidad de la Construcción, 2008)

3. Sistemas de conservación de suelos en Oriente Próximo, comparación con las técnicas usadas en las islas Canarias

Existe una relación interesante entre los sistemas de aprovechamientos de aguas superficiales y conservación de suelos en *terrenos semiáridos* de otras áreas geográficas, especialmente las de Oriente Próximo, en comparación con las infraestructuras

tradicionales de las islas Canarias, principalmente las zonas con menor pluviometría, como puede ser la zona del sur de Tenerife, Fuerteventura y Lanzarote.

Es destacable, la similitud de las infraestructuras de ambas regiones, tal vez por la proximidad del archipiélago, a una zona de influencia árabe como es el Sáhara, no obstante la mayor parte de los sistemas aquí estudiados pertenecen a la región de Israel correspondiente al desierto del *Negev*.

3.1. Sistema Guadi

El sistema *guadi* es un sistema de generación de suelo fértil, así como de retención de aguas de escorrentías, para su uso en agricultura principalmente empleado en zonas del Negev (Israel). Es similar a los *nateros* canarios con la única diferencia de que estos, los de nuestras islas, carecen de aliviaderos.

El sistema se fundamenta en la construcción de pequeños muros, de no más de medio metro, mediante piedras del entorno, en la zona central puede haber un aliviadero o un dissipador de energía, construido mediante las propias piedras o por escalonamiento del muro. El agua procede de las escorrentías de los barrancos ya que los *guadi* se disponen en la zona de menor cota del valle.

Se suelen plantar especies arbóreas o bien viñas. Otro aspecto interesante en este tipo de infraestructuras, es también que en algunas zonas, el almacenamiento de agua se realiza en pozas o cavidades enterradas en las laderas y recubiertas con un material impermeable, similares a las pozas en la zona de influencia del árbol Garoé en el Hierro.

En las laderas del valle, con el fin de aumentar la escorrentía, antiguamente se procedía a amontonar las piedras en bloques en las lomas de los valles, dejando libre el terreno de interferencias para que fluyera el agua de una manera más fácil.



Figura 16.7; Sistema Guadí de retención de aguas y suelo en el desierto del Negev, Israel.
(Santamarta JC, 2009)

3.2. Sistema Liman

El sistema *Liman* es otro de los sistemas utilizados también en el desierto del Negev, en este caso se puede comparar con el sistema canario de almacenamiento de agua de lluvias *charcas secas*, utilizado en Fuerteventura, salvo en ciertas cuestiones, como son; la existencia de una plantación de árboles del género *acacia* (en un pequeño número), cuyo fin es crear sombra y un pequeño microclima para las poblaciones aledañas y pastores, son especies autóctonas.

La cuestión de la plantación de árboles puede ser un poco controvertida ya que estos también consumen agua por transpiración, no obstante, según estudios de la Universidad de Ben Gurión de Israel, favorecen y dinamizan la infiltración de agua de lluvia al acuífero que está por debajo de esta vegetación.

En sí, el sistema de captación de agua, se basa en una cuenca de recepción de las pocas lluvias de la zona, en torno a 150 mm/m² esta agua recogida se encauza mediante unos pequeños valles y barrancos de recogida, en cuyas pequeñas laderas,

se encuentran pequeñas vegetaciones de matorrales. Por gravedad el agua se dirige hacia los *Liman* que están en zonas de menor altitud.

Los *Liman*, generalmente son ovalados o circulares, con una extensión relativamente pequeña, de unos 60 m de diámetro, en la parte exterior se ejecuta un pequeño muro, de materiales sueltos de no más de un metro y medio de altura y uno o dos metros de espesor, por el lado de mayor cota del terreno, se realiza un acceso o tomadero, por dónde el agua es canalizada, procedente de los valles, en algunos *Liman*, se han instalado medidores de caudales Parshall, así como pequeños pluviómetros y medidores del nivel freático para el posterior estudio del comportamiento del agua.

Otro punto a tener en cuenta, en este tipo de infraestructura de recolección de aguas, es la construcción de un aliviadero en un lateral, para poder minimizar posibles avenidas, también se ha comprobado, que algunos disponen de pequeños sondeos para la captación de aguas subterránea, ya que la distribución y localización de los *Liman*, no es causal sino que responde a un profundo estudio hidrológico e hidrogeológico.

Como volumen medio de agua embalsada, se han encontrado valores de referencia en torno a 3.000 m³ de agua con una cota de aproximadamente 1,40 m, cantidad que no es baladí, hablando de ambientes semiáridos.

En época de lluvias estos sistemas se comportan como auténticos oasis y piscinas por lo que cumplen con otra función importante, la de abastecer de agua al ganado de la población nómada que discurre y vive en el desierto.

Estos sistemas no generan terrenos de cultivo, ni zonas para abastecimiento de agua a la población, salvo en el caso de que se disponga de un sondeo de captación de agua subterránea, su función primordial como se ha comentado es básicamente como zona de sombra, abastecimiento de agua al ganado y recarga local del acuífero de la zona de influencia.

En el caso de las *charcas* de Fuerteventura, recogen el agua procedente de los barrancos, cuando hay precipitaciones, son unos pequeños embalses, impermeabilizados por la deposición de los sedimentos que transportan las aguas que fluyen por los barrancos. Las *charcas* almacenan aguas cargadas de sales debido a la composición del terreno. Su uso principal es para la agricultura, no dispone de plantaciones de árboles ni zonas habilitadas para el ganado, tampoco disponen de aliviadero y las alturas de los diques de cierre son sensiblemente mayores que los anteriores.



Figura 16.8: Liman en Arad, Israel. (Santamarta J, 2009)

3.3. Caballones

Los caballones son muros de piedra o materiales sueltos, que se construyen según las curvas de nivel del terreno. Su función es; frenar y filtrar al subsuelo la escorrentía, no sólo recolectan agua, también capturan sedimentos, por lo tanto crean y conservan el suelo donde es necesario que tengan una pendiente uniforme. Esta técnica es profusamente utilizada en varias partes del mundo especialmente en los países árabes y algunos países de Latinoamérica.

El rango de precipitaciones para aplicar esta técnica es entre 200 y 700 mm, la distancia entre caballones varía entre 15 y 30 m, la altura mínima del caballón debe ser de 25 cm con una base de 35-40 cm, junto al caballón debe haber una zanja poco profunda para prevenir el efecto de socavación en el muro debido a las escorrentías.



Figura 16.9; Caballones en la zona Sur de Israel. (Santamarta J, 2009)

4. Cultivos andinos

En el territorio andino (Chile, Perú...) a semejanza de algunas islas de Canarias, se caracteriza por su accidentada topografía y variedad climática; también existen similitudes (por las grandes pendientes de las laderas) con el abancalamiento del terreno como estrategia agrícola e hidráulica. Entre las técnicas utilizadas en Canarias y en la zona andina en Latinoamérica existen similitudes, incluso como anécdota curiosa se puede comentar que existe una variedad de legumbres que recibe el nombre de canarios. La agricultura tradicional andina se caracteriza por la predominancia actual de pequeñas extensiones de terreno o parcelas, distribuidas a diferentes alturas y en topografías y regímenes de lluvias muy diferentes. Podemos entender estas estrategias como una agricultura de ladera, generalmente en pendientes de más del 30%, aunque en algunos casos se cultiva en valles.

También hay que destacar que la selección de los cultivos a desarrollar, trata de ser la más eficiente en el sentido de; ser resistentes a las heladas, a los periodos de sequía y a la salinidad de sus suelos. Los cultivos producen los siguientes alimentos; granos andinos (quinua, kiwicha, cañihua); Leguminosas (frijol, haba, tarwi, guisan-

te, lenteja); Cereales (trigo, cebada, avena); Tuberosas (oca, ulluco). La elección de un cultivo u otro depende entre otros factores de la altitud, para las laderas se suelen plantar cereales y tubérculos, reservándose para las zonas de valle el maíz.

Las estrategias agrícolas utilizadas se pueden resumir en se pueden encontrar alternativas de adecuación a la topografía y orografía del terreno que conforman las laderas, se utilizan los andenes (pata pata), los campos elevados o camellones (waru waru) y por último las terrazas.

4.1. Andenes o pata pata

El sistema de andenes, estabiliza las tierras y, en combinación con los canales de riego, extiende la actividad agrícola a espacios marginales, en cierta manera son similares a los bancales con muro de piedra volcánica, utilizados en Canarias. Los andenes generalmente tienen una longitud que oscila entre 4 y 100 m, por un ancho que van desde los 1,5 m a los 20 m. Tienen una antigüedad estimada en 3.000 años a.C. se componen de los siguientes elementos;

- Muro o *Anchaca*.
- Terraplén.
- Canales de riego.
- Accesos.

Siguiendo los criterios de diseño la pendiente de la ladera debe estar comprendida entre 4 y 60%. También hay que tener en cuenta las fuentes de agua, estos manantiales cercanos, lluvias, precipitación horizontal etc....

La pendiente del terreno suele variar de 0,1 y 0,3% para evitar principalmente procesos erosivos y conducir la escorrentía, el muro de cierre varía desde los 0,5 a los 3 m (muy superior a los muros de bancales canarios que suelen ser de menores dimensiones), además en el caso andino existen tres muros, con tres estratos, esto último facilita el drenaje del agua y reduce el stress al que está sometido el muro. La capa superficial es suelo apto para cultivo en algunas ocasiones este material es transportado desde otras localizaciones, es similar a los arenados de Lanzarote.

4.2. Camellones o waru waru

Es una estrategia utilizada en los páramos andinos, un territorio de planicies y valles accidentados de origen glacial con una gran variedad de lagunas, pantanos y praderas húmedas. Como resultado de la poca presencia humana, la calidad del agua es muy buena.

Se utilizan en planicies inundables, son fundamentalmente extensiones de terreno sobre elevado que permiten el aprovechamiento del suelo, la humedad, el agua y el control de la temperatura. Las medidas aproximadas del terreno varían desde alturas de 1,5 m por 20 m hasta los 100 m de ancho. Estas extensiones están rodeadas de canales. La elevación de los *waru waru* varía desde 20 cm hasta 75 cm.

Estas estrategias tienen tres funciones claras, una es almacenar calor del sol por el día para liberarlo por la noche y así evitar heladas, en otro sentido al estar el terreno de cultivo sobre elevado, en caso de fuertes escorrentías, se reducen los efectos por inundaciones por último el agua de los canales se infiltraba por capilaridad a las raíces de las plantas manteniendo la humedad requerida por los cultivos.

También se incrementa la fertilidad del suelo, debido a la incorporación de la materia orgánica acumulada en los canales.

4.3. Terrazas

Esta estrategia agrícola existe desde tiempos precolombinos. Las terrazas o bancales al igual que en las Islas Canarias o en las Baleares y otras mediterráneas, permiten la explotación agrícola en zonas montañosas de mucha pendiente. A lo largo de la historia en Latinoamérica, más concretamente en las culturas andina, donde se utilizaban como campo de cultivo y posteriormente en la inca donde se utilizaron como hidrotecnia para conservar los suelos de las laderas y proteger construcciones aguas abajo. Actualmente se pueden ver en Perú y en Bolivia de aspecto similar, salvando las distancias, se pueden encontrar estructuras parecidas en las islas de la Gomera, Tenerife, Gran Canaria...

Las terrazas siguen las curvas de nivel, no son estructuras tan rectas como lo puedan ser las otras estrategias comentadas. Pueden llegar a haber terrazas a unas altitudes entre 2.800 y 4.500 m

Tabla 16.2; Cultivos principales en las terrazas y altitudes.

CULTIVO PRINCIPAL O APROVECHAMIENTO	ZONAS	ALTITUD
Pastizal	Altas	>4.000 m
Papa	Medias	3.500-3.900 m
Maíz	Bajas	2.500-3.500 m

Bibliografía consultada y referencias

- BLOSIERS PINEDO, J. et al. (2000); *Agricultura de laderas a través de andenes. Manual de Captación y aprovechamiento de aguas de lluvia*. Chile.
- CABILDO DE FUERTEVENTURA-Caja de Canarias *El paisaje del agua en Fuerteventura* (2011). Madrid.
- DÍAZ HERNÁNDEZ, R. (2008): “El paisaje agrario en Gran Canaria” y “Agua, patrimonio y paisaje en Canarias”, en *La cultura del agua en Gran Canaria*, Consejería de Obras Públicas y Transportes del Gobierno de Canarias, pp. 55-72 y 117-142.
- GONZÁLEZ MORALES, A. (1993): “Aprovechamientos de las aguas y sistemas de riego en Fuerteventura”, en *V Jornadas de Estudios sobre Fuerteventura y Lanzarote*, Servicio de Publicaciones del Cabildo Fuerteventura, Tomo II. Puerto del Rosario, pp. 13-40.
- GONZÁLEZ MORALES, A. (2006): *El agua en Lanzarote*. Anroart Ediciones. Las Palmas de Gran Canaria.
- GONZÁLEZ RODRÍGUEZ, J.M. (1991): “Tecnología popular tradicional de los sistemas de riego en Canarias” en *Anuario de Estudios Atlánticos*, nº 37, pp. 467-497. Las Palmas de Gran Canaria.
- HERNÁNDEZ GUTIÉRREZ, S. (2006): “Agua y arquitectura tradicional”, en *La cultura del agua en Lanzarote*. Consejería de Obras Públicas y Transportes del Gobierno de Canarias-Cabildo de Lanzarote. Islas Canarias, pp. 269-286.
- HERNÁNDEZ MARTÍN, F.M. (2011): *Apuntes sobre el Patrimonio Etnográfico de Tenerife*. Asociación Cultural “Pinolere. Proyecto Cultural”. La Orotava. Tenerife. «Cap. IV. El Patrimonio Hidráulico. Arquitecturas del Agua”, pp. 72-121».
- LAHORA ARÁN, C.; *El ecosistema agrario Lanzaroteño*. Edita Cabildo Insular de Lanzarote. M-27655-2005
- LEÓN HERNÁNDEZ, J. DE (2006): *Lanzarote bajo el volcán. La reconstrucción del territorio, los recursos potenciales y la infraestructura construida cubiertos por las erupciones volcánicas del siglo XVIII en la isla de Lanzarote*. Tesis doctoral. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Disponible en línea: <http://contentdm.ulpgc.es/cdm4/item_viewer.php?CISOROOT=/POSTULPGC&CISOPTR=3008&CISOBX=1&REC=15>
- MORALES MATOS, G. y SANTANA SANTANA, A. (2005): *Islas Canarias. Territorio y Sociedad*. Colección Textos Universitarios. Anroart Ediciones. Las Palmas de Gran Canaria.
- PAIS PAIS, F.; PELLITERO LORENO, N. y ABREU DÍAZ, C.A. (2007): *Sistemas de aprovechamiento del agua entre los Benahoritas y su pervivencia en la época histórica*. Cuadernos CICOP para la divulgación del Patrimonio Cultural y Natural, nº 12. San Cristóbal de La Laguna. Tenerife.
- PAIS PAIS, F. (2008): «Los benahoritas y el agua: una cuestión de supervivencia», en *La cultura del agua en La Palma*. Gobierno de Canarias. Consejería de Infraestructuras, Transporte y Viviendas. Dirección General de Aguas. Islas Canarias, pp. 59-76.
- PERDOMO CERPA, M. (2006): “Firgas. El berro y sus cosecheros”, en *El Pajar. Cuadernos de Etnografía Canaria*. La Orotava. Santa Cruz de Tenerife, pp. 79-81.
- PERDOMO MOLINA, A. (2000): “Los manantiales de ñames de Anaga”, en *El Pajar. Cuadernos de Etnografía Canaria*. La Orotava. Santa Cruz de Tenerife.

- PERDOMO MOLINA, A. (2002): "El sistema de cultivo en gavías en Fuerteventura (Islas Canarias, España): la gestión del agua en un espacio árido", en *Antología sobre pequeño riego. Volumen III. Sistemas de riego no convencionales*. Ed. Jacinta Palerm Viqueira, Colegio Postgraduados México.
- PERDOMO MOLINA, A. (2005): "Los nateros de Canarias: producir aunque no llueva", en *El Baleo*, nº 28, Sociedad Cooperativa del Campo La Candelaria.
- PERDOMO MOLINA, A.; Y DUPUIS, I. (2004): *Los nateros: un sistema de recolección de agua adaptado a las zonas áridas y montañosas de Canarias*. Revista de Cultura Popular Canaria Tenique. Nº 6. pp. 235-252.
- REYES AGUILAR, A. (1989): *Estrategias hidráulicas en la isla de La Gomera*. Museo Etnográfico-Cabildo de Tenerife-Cabildo de La Gomera. Santa Cruz de Tenerife.
- ROMERO MARTÍN, L. E.; RUIZ FLAÑO, P. Y HERNÁNDEZ CALVENTO, L. (2003): «El espacio de bancales en el tramo inferior de la Cuenca del Guiniguada: características ecoantrópicas», en *Vegueta*, nº 7, ULPGC. Las Palmas de Gran Canaria, pp. 211-227.
- ROMERO, L.; RUIZ, P.; MAYER, O.; PÉREZ CHACÓN E. Y HERNÁNDEZ L. (2006): *Clasificación y caracterización geológica de los bancales de la cuenca del Guiniguada (Gran Canaria, Islas Canarias, España)*, en *Actes de les Jornades Sobre Terrasses I. Prevenció de Riscos Naturals, Mallorca, 14, 15 i 16 de setembre, 2006*, pp. 65-76.
- SABATÉ BEL, F. (1993): *Burgados, tomates, turistas y espacios protegidos. Usos tradicionales y transformaciones de un espacio litoral del sur de Tenerife...*, Servicio de Publicaciones de la Caja General de Ahorros de Canarias. Santa Cruz de Tenerife.
- SANTAMARTA CEREZAL, J.C.; RODRÍGUEZ J. (2008). *Singularidades de las obras hidráulicas para abastecimiento de agua potable en medios volcánicos. El caso del archipiélago Canario. España. Congreso Internacional sobre Gestión y Tratamiento del Agua. Córdoba, Argentina*.
- SANTAMARTA CEREZAL, J.C (2009) *Singularidades sobre la construcción, planificación y gestión de las obras y recursos hídricos subterráneos en medios volcánicos. Estudio del caso en las Islas Canarias occidentales. Tesis (Doctoral), E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos (UPM) [En línea]. Universidad Politécnica de Madrid 2010, [ref. de 15 Octubre 2010]. Disponible en Web: <http://oa.upm.es/3389/>*
- SANTAMARTA CEREZAL, J.C. (2009). *La minería del agua en el archipiélago canario*. Sociedad Española para la Defensa del Patrimonio Geológico y Minero. *De Re Metallica*, 12 1-8.Madrid.
- SANTAMARTA CEREZAL, J.C; ITZJAK, M. EVLANGON, D. (2010): *Forest hydrology for increasing water resources and run-off in semiarid zones. The case of the Canary islands and the semiarid zone of Israel. 24th IUFRO Conference for Specialists in Air Pollution and Climate Change Effects on Forest Ecosystems: Adaptation of Forest Ecosystems to Air Pollution and Climate Change. Antalya. Turkey*
- SUÁREZ MORENO, F. y SUÁREZ PÉREZ, A. (2005): *Guía del Patrimonio Etnográfico de Gran Canaria. Cabildo de Gran Canaria. Las Palmas de Gran Canaria*.
- TAPIA, M.; FRIES, A.M. (2007): *Guía de Campo de los Cultivos Andinos*.FAO.
- VVAA (2006): *La cultura del agua en Lanzarote*. Gobierno de Canarias. Consejería de Infraestructuras, Transporte y Viviendas. Dirección General de Aguas-Cabildo de Lanzarote. Islas Canarias.
- VVAA (2007): *La cultura del agua en La Palma*. Gobierno de Canarias. Consejería de Infraestructuras, Transporte y Viviendas. Dirección General de Aguas. Islas Canarias.
- VVAA (2008): *La cultura del agua en Gran Canaria*. Gobierno de Canarias. Consejería de Infraestructuras, Transporte y Viviendas. Dirección General de Aguas. Islas Canarias.
- VVAA (2008): *La cultura del agua en La Gomera*. Gobierno de Canarias. Consejería de Infraestructuras, Transporte y Viviendas. Dirección General de Aguas. Islas Canarias.

Construcción de obras y aprovechamientos hidráulicos en terrenos e islas volcánicas. Ingeniería geológica y geotécnica

Luis Enrique Hernández Gutiérrez

Juan Carlos Santamarta Cerezal

José Antonio Rodríguez Losada

1. Introducción

La ingeniería geológica y geotécnica aplicada a las obras e infraestructuras hidráulicas, es una disciplina que en los últimos años ha tenido un gran desarrollo en Canarias, debido en gran parte a que se ha configurado un panorama normativo en el que los estudios geotécnicos son preceptivos en el proceso constructivo. A la hora de acometer o diseñar una obra hidráulica en un medio insular, la singularidad geológica del Archipiélago Canario, de naturaleza volcánica, su lejanía y su pequeña superficie respecto al territorio peninsular, hace que, en la mayoría de las ocasiones, no se recojan los aspectos referidos a las propiedades del terreno en las instrucciones y códigos que se dictan a escala nacional, quedando ciertas lagunas interpretativas que debe sortear el profesional canario, muchas veces sin éxito.

Los procesos geológicos que han dado lugar a los materiales rocosos que se pueden encontrar en el territorio continental de la Península Ibérica han sido muy lentos, cuantificándose generalmente en decenas, centenas e incluso miles de millones de años. Estos materiales generados por la dinámica cortical se estratifican, deforman y fallan creando un entramado de accidentes tectónicos que son objeto de estudio

en el campo de la Geología Estructural. Sin embargo, el fenómeno volcánico genera materiales rocosos casi de forma instantánea, que son esparcidos por la superficie terrestre, en la mayoría de las ocasiones, de manera caprichosa y errática, precisando de otra disciplina para su estudio e interpretación geotécnica, como es la Volcanología.

Las Islas Canarias constituyen una de las regiones volcánicas más interesantes del planeta ya que en ellas han acontecido la mayoría de los procesos volcánicos que se pueden dar, pudiéndose encontrar un amplio espectro de materiales y estructuras volcánicas. Por este motivo, cualquier estudio o investigación, que en el ámbito de la geotecnia se realice en Canarias, es fácilmente extrapolable a cualquier otra región volcánica del mundo.

Las propiedades morfológicas y litológicas de los terrenos volcánicos de Canarias son muy conocidas por los numerosos estudios geológicos que se han realizado en las islas, que han dado como fruto una extensa bibliografía y una cartografía geológica de detalle en todo su territorio. Esto contrasta de manera significativa con una literatura muy escasa en lo que se refiere a propiedades geotécnicas.

2. Unidades geotécnicas y problemas asociados

Toda la actividad volcánica efusiva de las Islas Canarias ha llevado a la construcción y crecimiento subaéreo del archipiélago, de forma que, actualmente, se encuentran en superficie, bien edificios volcánicos muy recientes, correspondientes a los últimos eventos volcánicos o bien escudos volcánicos y materiales muy antiguos y en general muy alterados, de los cuales hoy queda visible una mínima parte de los que fueron en el Mioceno-Plioceno. Este es el caso de los macizos más antiguos de las islas occidentales cuya antigüedad se puede inducir de los profundos y cerrados barrancos excavados por la continua erosión y que, al no haber sido rellenados por emisiones volcánicas más recientes, presentan una morfología en forma de agudas crestas, fondos de barranco muy profundos y angostos y laderas con pendientes que, en ocasiones, se aproximan a la verticalidad. Este paisaje tan abrupto contrasta sin embargo con la suavidad del relieve de las islas orientales, de mayor edad, que han sido más erosionadas.

En este marco geológico se han podido distinguir las siguientes unidades geotécnicas de naturaleza volcánica, en función de la litología, estructura y distribución

espacial de los materiales (Rodríguez-Losada et al., 2009, Hernández et al., 2010 y Gobierno de Canarias, 2011).

Tabla 17.1; Unidades Geotécnicas de naturaleza volcánica

UNIDAD	SUBUNIDAD
COMPLEJOS BASALES	
COLADAS Y MACIZOS SÁLICOS	
MACIZOS BASÁLTICOS ALTERADOS	
COLADAS BASÁLTICAS SANAS	<i>Coladas “aa” poco escoriáceas</i>
	<i>Coladas “pahoehoe” y “aa” muy escoriáceas</i>
MATERIALES PIROCLÁSTICOS	Ignimbritas y tobas
	Depósitos piroclásticos sueltos o débilmente cementados
MATERIALES BRECHOIDES	

2.1. Complejos basales

Considerados como las raíces de los primitivos edificios volcánicos, los complejos basales de las Islas Canarias están representados por sedimentos cretácicos, lavas submarinas y rocas plutónicas (gabros y sienitas). Este conjunto está atravesado por multitud de diques con una densidad de intrusión tan elevada que frecuentemente no dejan rastro de la roca encajante. Es habitual que presenten un alto grado de alteración por lo que generalmente los materiales rocosos son deleznales y de difícil reconocimiento. Todo ello les confiere características de roca blanda y fracturada, presentando generalmente valores del RMR_b (1) menores a 40.

(1) RMR_b : Índice RMR básico, utilizado para la caracterización geomecánica atendiendo a los criterios dados por Bieniawski (1989), sin penalizar por la orientación de las discontinuidades con respecto a la obra que se desea acometer.

Los problemas geotécnicos propios de esta unidad son los siguientes:

- Alta heterogeneidad, tanto en vertical como en horizontal. Posibles asientos diferenciales debidos a heterogeneidad.
- Materiales muy alterados, de baja resistencia y alta deformabilidad.

- Áreas de relieve abrupto y tectonizado. Inestabilidades puntuales o desprendimientos. Necesidad de estudios de estabilidad de ladera específicos.



Figura 17.1; Lavas almohadilladas o pillow lavas en Tenerife (Hernández L.E., 2007)

2.2. Coladas y macizos sálicos

Esta unidad constituida por materiales rocosos altamente resistentes, de naturaleza sálica (traquitas y fonolitas), aparece en dos formas de afloramiento:

- 1) Como **coladas de gran espesor**, habitualmente con disposición horizontal o como paquetes tabulares gruesos con pendientes no muy pronunciadas y gran extensión horizontal. En ocasiones, estos paquetes pueden estar formados por brechas muy compactas de fragmentos de naturaleza igualmente sálica.
- 2) Como **domos**, a modo de macizos rocosos de grandes dimensiones verticales enraizados en el subsuelo y de extensión horizontal más limitada. En cualquier caso, las características geotécnicas de ambos tipos de afloramiento se consideran, a efectos prácticos, similares por lo que procede considerarlos como una misma unidad geotécnica.

Ambos son coladas o macizos de composición traquítica o fonolítica, en general de alta capacidad portante con características de roca dura y valores de RMR_b comprendidos entre 75 a 90.

Esta unidad presenta muy pocos problemas geotécnicos. No obstante, cabría destacar los siguientes:

- Alteración superficial que puede ser localmente importante.
- Posibles asientos diferenciales debidos a heterogeneidad en brechas.



Figura 17.2; Detalle de colada fonolítica muy masiva y compacta, Tenerife (Hernández L.E., 2010)

2.3. Macizos basálticos alterados

Formada por coladas basálticas de pequeño espesor (en torno a 1 m o inferior) y alteración de moderada a alta. La peculiaridad destacable de las coladas basálticas es que se manifiestan como una alternancia vertical de niveles de compacto basáltico (roca basáltica) y niveles de escorias (material granular) que aparecen generalmente en forma de autobrecha debido al grado de alteración.

Además, en estos macizos alterados aparecen también intercalados mantos piroclásticos y frecuentes zonas rubefactadas, denominadas “almagres”, que en ocasiones corresponden a niveles de paleosuelos que han sido calcinados por el calor de la colada suprayacente. Generalmente presentan buzamientos suaves que pueden variar entre 10° a 30°.

Suelen presentar en superficie valores de RMR_b comprendidos entre 40 a 60.

Los problemas geotécnicos en esta unidad son, entre otros, los siguientes:

- Baja resistencia y elevada deformabilidad en situaciones de elevada alteración local.
- Inestabilidades puntuales en zonas próximas o adyacentes a relieves montañosos de pendiente moderada a alta. En general da lugar a fuertes abarrancamientos.
- La presencia de niveles escoriáceos intercalados produce una gran heterogeneidad.
- Asientos diferenciales por afloramiento de diferentes unidades.



Figura 17.3; Coladas basálticas alteradas, Gran Canaria (Mangas, J. 2009)

- Presencia de cavernas debido a la circulación de agua y la ya mencionada baja compactación.
- En términos generales, los niveles escoriáceos con avanzados estados de alteración, provocan impermeabilización y formación de materiales arcillosos que implicarían problemas adicionales entre los que cabe mencionar expansividad, elevada deformabilidad e inestabilidades de ladera.

2.4. Coladas basálticas sanas

En esta unidad se recogen las coladas basálticas que conservan su estructura original debido a su escaso estado de alteración, por lo que se pueden distinguir los tipos “pahoehoe” y “aa”.

Las lavas “pahoehoe” se caracterizan por tener una superficie lisa y ondulada, aunque en detalle aparecen con formas similares a vísceras o cuerdas entrelazadas y corrugadas (lavas cordadas). Internamente es de destacar la presencia de gran número de vacuolas o pequeños huecos más o menos esféricos que les otorgan gran



Figura 17.4; Superficie “pahoehoe”, El Hierro (Hernández, L.E., 2011).

porosidad. Debido a este hecho, han sido usadas tradicionalmente en las Islas Canarias para fabricar molinos de cereal y son conocidas vulgarmente como “risco molinero”. Sin embargo, el detalle interno más destacable es la presencia de túneles, galerías o tubos volcánicos que pueden alcanzar kilómetros de longitud y diámetros de varios metros, así como moldes de árboles que fueron arrollados por la colada. En las prospecciones que se realizan sobre estos materiales suele ocurrir que no sean detectados estos tubos volcánicos, lo que no significa que no existan.

Las lavas “aa” o lavas escoriáceas se forman con magmas algo más viscosos que las lavas “pahoehoe”, fluyen más lentamente y adquieren un aspecto totalmente distinto. La superficie es extremadamente rugosa o incluso espinosa, por lo que localmente se conocen como “malpaís”. El avance de la lava se realiza como el de las cadenas de una oruga, de forma que la superficie escoriácea ya enfriada se desploma delante del frente de la colada en movimiento y es recubierta por el interior todavía fundido que avanza. Por ello, la sección vertical de una lava “aa” consiste en una banda central de roca densa surcada por una red de diaclasas o fisuras formadas por retracción al enfriarse y solidificar el fundido, limitada abajo y arriba por dos franjas escoriáceas irregulares. Cuando hay un apilamiento de varias lavas “aa”, las escorias de techo se unen con las de la base de la colada situada inmediatamente encima, resultando una alternancia de bandas densas (basalto) y bandas escoriáceas (autobrecha). El efecto visual puede resultar engañoso y llevar a pensar que sólo son lavas las bandas densas y que los niveles escoriáceos tienen otro origen.

Entre estos dos tipos extremos de lavas (“pahoehoe” y “aa”) existen un importante grupo de términos intermedios que se denominan lavas de transición.

Al igual que en el caso de la unidad *Macizos basálticos alterados*, la presencia de niveles escoriáceos intercalados produce una gran heterogeneidad ya que provocan alternancias tanto vertical como horizontalmente. Estos niveles escoriáceos, que en esta unidad aparecen poco alterados, se comportan como suelos granulares poco compactos, aspecto que, junto con la existencia de cavernas, reduce considerablemente la calidad de los macizos rocosos.

Los niveles masivos de roca basáltica, en general presentan capacidad portante alta con valores de RMR_b comprendidos entre 60 y 85. Sin embargo, los niveles escoriáceos pueden presentar baja capacidad portante y gran deformabilidad, si las escorias están sueltas y sin matriz y capacidad portante moderada y poca deformabilidad si se encuentran soldadas o con matriz con cierto grado de cementación.

Por tanto, atendiendo a la tasa efusiva, viscosidad del magma, contenido en gases, pendiente del terreno, etc., estas coladas basálticas pueden dar como producto final materiales que presentan gran variabilidad en cuanto a composición y estado, por lo que es necesario el estudio de cada emplazamiento en particular. Así, a efectos de planificación del reconocimiento geotécnico, esta Guía considera que en esta unidad se pueden reconocer dos subunidades:

Coladas “aa” poco escoriáceas. En esta subunidad quedan incluidas las coladas basálticas de tipo “aa”, que presentan espesores de compacto basáltico sano iguales o superiores a 2 m, conservando su continuidad lateral en toda la parcela, con niveles escoriáceos inferiores a 0,5 m, ausencia de cavidades y una pendiente del terreno inferior a 15°.

Coladas “pahoehoe” y “aa” muy escoriáceas. En esta subunidad se incluyen las coladas basálticas “pahoehoe” y coladas “aa” con espesores de compacto basáltico sano inferiores a 2 m, niveles escoriáceos intercalados y/o presencia de cavidades.

Los problemas geotécnicos asociados a esta unidad son, entre otros, los siguientes:

- Asientos diferenciales debidos a la presencia de materiales rocosos duros próximos a materiales granulares de alta deformabilidad (coladas “aa”).
- Posible presencia de oquedades debido a la existencia de tubos volcánicos y dificultad para su detección, que pueden producir hundimientos y colapsos (coladas “pahoehoe”).
- Existencia de niveles escoriáceos con parámetros geotécnicos muy desfavorables intercalados entre los materiales masivos más resistentes.
- Los niveles escoriáceos presentan gran complejidad y dificultad para su caracterización geotécnica.
- Inestabilidades de laderas naturales o de taludes excavados, como consecuencia de la presencia de niveles escoriáceos sueltos, que pueden producir desplomes de los niveles masivos por erosión diferencial.
- Caída de bloques separados por disyunción columnar.



Figura 17.4; Esquema de lava “aa”, El Hierro (Hernández, L.E., 2011).



Figura 17.4; Esquema de lava “aa”, El Hierro (Hernández, L.E., 2011).**Figura 17.5;** Colada basáltica “aa” de gran espesor de compacto basáltico, Tenerife (Hernández, L.E., 2003).

2.5. Materiales piroclásticos

Está formada por extensiones de depósitos piroclásticos de composición indiferenciada. Se forman cuando los fragmentos de magma caen y se depositan en las inmediaciones del foco de emisión. Las potencias y buzamientos tienen relación con la disposición de la topografía sobre la que se han depositado en el momento de la erupción. La erosión determina también variaciones en los espesores originales.

Se clasifican según el tamaño y la composición. Los basálticos de pequeño tamaño se denominan *cenizas* (menores de 2 mm), los intermedios *lapillis* (entre 2 y 64 mm) y los de mayor tamaño reciben el nombre genérico de *escorias*, que en algunos casos adquieren formas redondeadas al girar en el aire (bombas). Los traquíticos y/o fonolíticos, más ligeros, claros y porosos, constituyen los depósitos de pómez.

Los denominados conos de cinder están formados por depósitos mixtos, desde el punto de vista granulométrico, predominantemente escoriáceos. Se acumulan alrededor de la chimenea eruptiva construyendo los conos volcánicos, también conocidos como conos de *tefra*. Localmente estos materiales pueden estar cementados y entonces reciben en nombre genérico de *tobas*.

Por tanto, esta unidad puede subdividirse a su vez en dos:

Ignimbritas soldadas y tobas. Se trata de rocas duras o semiduras. Se corresponden con depósitos piroclásticos pumíticos o cineríticos muy compactos, tales como ignimbritas con o sin textura eutaxítica o cineritas compactas. Esta variedad de materiales se origina cuando una masa de productos piroclásticos es transportada en forma de dispersión de gas y de alta o moderada densidad de partículas; el resultado es un material con características de roca más o menos dura, con un grado de compacidad y/o cementación variable. Durante su formación han cubierto las depresiones topográficas existentes en el momento de la erupción. Es el caso de las ignimbritas soldadas, que se asemejan más a un flujo lávico que a un depósito piroclástico. A las ignimbritas no soldadas, de tonalidades blancoamarillentas y con contenidos apreciables de pómez, se les conoce localmente en Canarias con el nombre de “toba” o “tosca”, al igual que los piroclastos de proyección aérea cementados. Presentan en superficie valores de RMR_p comprendidos entre 60 a 75.



Figura 17.6; Ignimbrita soldada, Gran Canaria (Hernández, L.E., 2003).

Materiales piroclásticos sueltos o débilmente cementados. Suelen ser poco compactos y fácilmente colapsables. Se forman cuando los fragmentos de magma caen y se depositan en las inmediaciones del centro eruptivo. Los de mayor tamaño reciben el nombre genérico de escorias, que en algunos casos adquieren formas redondeadas al girar en el aire (bombas); los traquíticos y/o fonolíticos, más ligeros, claros y porosos, constituyen los depósitos de pómez, también conocidos como depósitos plinianos o de lluvia piroclástica. Por tanto se trata de depósitos piroclásticos de baja densidad, con pesos específicos aparentes secos medios habituales entre 7 y 13 kN/m³. Presentan valores de RMR_b comprendidos entre 0 a 25.



Figura 17.7; Depósito de piroclastos sueltos tamaño lapilli, Tenerife (Hernández, L.E., 2005).

Los problemas geotécnicos más habituales de estos materiales son los siguientes:

- Resistencia variable, desde media a alta resistencia y baja deformabilidad (ignimbritas), a baja resistencia y elevada deformabilidad (piroclastos sueltos).
- Colapsabilidad mecánica (piroclastos sueltos).
- Asientos diferenciales (piroclastos sueltos).
- Presencia de niveles orgánicos que pueden incrementar la cuantía y duración de los asentamientos.
- Moderada expansividad. Este es un factor a considerar con mayor detenimiento en los niveles piroclásticos sueltos, especialmente si los procesos de alteración producen localmente niveles arcillosos.

2.6. Materiales brechoides

Esta unidad está asociada a episodios eruptivos violentos de alta explosividad, en ocasiones relacionados con procesos de colapso de caldera o bien con fenómenos de deslizamientos gravitacionales en masa. Su resultado final es una masa caótica y brechoide formada por bloques de naturaleza diversa, en general muy angulosos, con gran variación de tamaño de los mismos englobados en una matriz fina más o menos cementada y ocasionalmente muy dura. Forman paquetes de grandes espesores (hasta cientos de metros) y presentan pendientes poco pronunciadas de brechas compactas y caóticas de naturaleza mono o polimíctica.

Pueden presentar características de roca dura y en algunos casos semidura. Presentan valores de RMR_b comprendidos entre 60 y 75.

Los problemas geotécnicos potenciales a tener en consideración son los siguientes:

- Inestabilidades de laderas naturales o de taludes excavados.
- Agresividad de aguas freáticas.
- Asientos diferenciales debido a la presencia de bloques de gran tamaño.



Figura 17.8; Brecha volcánica, Gran Canaria (Mangas, J., 2009)

3. Aspectos geotécnicos en las minas o galerías de agua en terrenos volcánicos

Los aspectos geotécnicos son una de las cuestiones más complicadas a la hora de diseñar o ejecutar un proyecto minero de aprovechamiento de aguas subterráneas en terrenos volcánicos.

Los materiales volcánicos son extremadamente heterogéneos, isótropos discontinuos y difíciles de predecir a diferencia, en general, de las formaciones continentales no volcánicas, más continuas y competentes en general. La configuración habitual del terreno en ambientes volcánicos insulares, consiste en la acumulación de distintas sucesiones de emisiones lávicas producto de erupciones efusivas, en su gran mayoría de carácter fisural, que configuran un paisaje dominado en su mayoría por lavas y depósitos piroclásticos. Dependiendo de la tasa efusiva, de la explosividad de la erupción y de las características reológicas de los materiales emitidos, éstos se pueden distribuir espacialmente de forma más o menos caótica y desordenada, lo que les confiere el carácter heterogéneo mencionado.

Durante la perforación de una galería es necesario conocer el comportamiento del terreno que va atravesando la raza de la mina, no obstante esta auscultación en los terrenos continentales es más exhaustiva y completa que en terrenos volcánicos. En una sola perforación sería posible encontrarse todos los litotipos volcánicos existentes.

Otra de las peculiaridades de los medios volcánicos insulares es su relieve muy accidentado. Toda la actividad volcánica efusiva de las Islas Canarias ha llevado a la construcción y crecimiento subaéreo del archipiélago, de forma que, actualmente, se encuentran en superficie, bien edificios volcánicos muy recientes, correspondientes a los últimos eventos volcánicos o bien escudos volcánicos y materiales muy antiguos y en general muy alterados, de los cuales hoy queda visible una mínima parte de los que fueron en el Mioceno-Plioceno. Este es el caso de los macizos más antiguos de las islas occidentales cuya antigüedad se puede inducir de los profundos y cerrados barrancos excavados por la continua erosión y que, al no haber sido rellenados por emisiones volcánicas más recientes, presentan una morfología en forma de agudas crestas, fondos de barranco muy profundos y angostos y laderas con pendientes que, muchas veces, se aproximan a la verticalidad, como en el barranco de Badajoz en Güimar, Tenerife. La obtención de la información geológica en este caso se hace verdaderamente complicada, porque en muchas ocasiones se tendría que recurrir a sondeos verticales de gran profundidad (más de 500 metros). Una solución habitual es la perforación de un *sondeo horizontal* en el frente de la excavación de unos 50 m de longitud, principalmente para estimar las alturas de las láminas de agua sobreelevadas por *diques*, que se disponen en la traza de la galería, para evitar problemas de inundación y garantizar la seguridad de los operarios.

En algunas ocasiones se ha investigado el terreno, para la construcción de obras de explotación de aguas, mediante la visita mediante barco de los acantilados costeros, recogiendo información como el buzamiento de las coladas, estimación de potencias, materiales...

También se pueden estimar las propiedades del terreno y conocer los materiales geológicos que se van a atravesar consultando bibliografía de trabajos realizados en materiales similares. Respecto a las características geotécnicas del terreno que se va a excavar, generalmente el terreno masivo, no presenta problemas de estabilidad. En la parte granular (escorias y piroclastos) se suele producir una sección más redondeada, siendo necesario en ocasiones recurrir a sistemas de sostenimiento (cerchas, gunitado), con la función de armar el terreno en estos tramos.



Figura 17. 9; Vista en sección de la galería atravesando coladas basálticas.
(Santamarta JC, 2007)

Con estos condicionantes, se debe plantear la construcción de la galería a sección completa, y en la mayor parte de la misma, al considerarse la excavación como autoestable, no será necesaria la aplicación de ninguna medida de refuerzo. En el caso de que alguna de estas premisas no se cumplan podemos recurrir a los diferentes tipos de sostenimiento disponibles para este tipo de infraestructuras. En el caso continental, en general, los sostenimientos de túneles hidráulicos son fundamentales para evitar el colapso de la infraestructura, en el caso volcánico las zonas masivas de las coladas, en general son autoportantes y solamente en pocos casos hay que recurrir al revestimiento. Pero es fundamental disponer de la menor zona del túnel revestida, ya que ésta tiene una función drenante. Aunque la galería tenga como función el trasvase de agua, al atravesar en las islas, en parte el acuífero insular, la obra puede funcionar como una galería drenante cumpliendo dos misiones: Una la del transporte del agua hacia otra cuenca, más deficitaria en aguas; y dos la de captación de aguas, para lo cual además de la conducción de transporte, deberá disponer de un canal, con la pendiente adecuada, que sea capaz en sección de drenar todo el agua posible.

En el caso de utilizar revestimientos en la galería se deben controlar los siguientes parámetros técnicos;

- Presión ejercida por el terreno sobre el revestimiento. Tensión en el revestimiento.
- Deformaciones del revestimiento.
- Desplazamiento de las juntas.
- Presiones intersticiales en el terreno.

A modo de ejemplo se aporta la siguiente tabla con los tipos de materiales posibles a encontrar en la excavación y las soluciones recomendadas en la ejecución de galerías en terrenos volcánicos.

Tabla 17.2; Ejemplo de recomendaciones de sostenimiento en función de las características del terreno.

CARACTERÍSTICAS Y CLASIFICACIÓN DEL MACIZO ROCOSO	SOSTENIMIENTO		
	COMPONENTES		
	Hormigón	Bulones	Cerchas
Compacto de masivo de lava o con alguna intercalación ocasional de escorias y piroclastos, de reducido espesor RMR > 70 y Q > 13 Macizo rocoso de “buena calidad”	Proyectado con fibra* e= 10 cm	Tipo Swellex de 10 Tn y 4 m 1,5 L x 2,0 m T	—
Compacto de masivo de lava con alguna intercalación de escorias o piroclastos de espesor métrico, pero que no afecta a la clave ni a la solera RMR entre 60 a 70 y Q entre 5 a 13 Macizo rocoso de “mediana calidad”	Proyectado con fibra* e= 15 cm	Tipo Swellex de 10 Tn y 4 m 1,0 L x 2,0 m T	—
El mismo macizo rocoso pero con la intercalación métrica de escorias o piroclastos situada a nivel de la clave; o bien, siempre que se observen condiciones de bloques delimitados por planos de discontinuidad, en bóvedas u hombreras	Proyectado con fibra* e= 20 cm	Tipo Swellex de 10 Tn y 4 m 1,0 L x 2,0 m T	1 TH-29 / 1,0 m con tresillos
El mismo macizo rocoso pero con la intercalación métrica de escorias o piroclastos situada a nivel de la solera	Proyectado con fibra* e= 15 cm	Tipo Swellex de 10 Tn y 4 m 1,0 L x 2,0 m T	—
Depósitos masivos de escorias y piroclastos o con alguna intercalación ocasional de compacto de masivo de lava RMR ≈ 60 y Q ≈ 5 Macizo rocoso de “mediana calidad”	Proyectado con fibra* e= 20 cm	Tipo Super Swellex de 20 Tn y 6 m 1,0 L x 2,0 m T	1 HEB-160 / 1,0 m con tresillos

Q: Índice Q de Barton

*En el hormigón proyectado, la proporción recomendable de fibra es de 45 kg/m³.

En las siguientes secciones se pueden observar las soluciones adoptadas en función del problema de sostenimiento encontrado.

a) Problema de inestabilidad de escorias.

En este caso, ocurrido en la galería de la Fuente Santa en La Palma, la excavación resultó ser bastante complicada y costosa para el erario público, debido a que se estaba ejecutando una galería en un terreno procedente de erupciones recientes, como fueron las coladas del volcán San Antonio y del volcán Teneguía. Otro factor a considerar fue que la traza estaba orientada hacia el acantilado, y en un momento dado de la excavación iban a aparecer bolos y piedras de costa o el propio acantilado. Como solución se establecieron cerchas con redondos y a trasdós se colocaban las piedras gruesas del propio terreno, lo que supuso a la vez una buena solución desde el punto de vista estético.



Figura 17.11; Sostenimiento de una galería mediante cercha y piedra en la Galería de la Fuente Santa, La Palma (Santamarta J, 2009)

b) Problemas de inestabilidad de piroclastos en conos volcánicos.

En este caso se pueden utilizar los propios piroclastos como áridos de un hormigón armado, al introducir en los mismos bulones, por los que se inyecta la lechada de cemento, ganando el material resistencia y estabilidad. La elevada porosidad del material facilita la penetración y dispersión de la lechada, generando bulbos de gran extensión alrededor del bulón

También es posible el empleo de cerchas y hormigón proyectado. La cercha tiene una función resistente, trabajando como un arco y colaborando con el hormigón proyectado. Otra función de las cerchas es definir claramente la geometría del túnel, lo que ayuda a conseguir los espesores adecuados de hormigón proyectado y a evitar sobreexcavaciones o zonas dentro de gálibo.



Figura 17.12; Sostenimiento de galería mediante cerchas y gunitado del arco (Santamarta J, 2008)

Por último en el caso de emboquilles, que no necesiten una gran resistencia o bien en zonas centrales de la galería, al atravesar las escorias de una colada, que no represente una gran continuidad, se suele recurrir a las placas metálicas con perfiles y cerchas como se puede ver en la ilustración siguiente.

Este sistema integral (con cerchas de montaje, chapas continuas solapadas relleno de hormigón) sigue siendo una opción válida para macizos de calidad mala o muy mala. En todo caso la combinación de *cerchas HEB* con *chapas BERNOLD*, apoyadas sobre las alas de las cerchas, y con relleno de hormigón bombeado o proyectado, constituye un método muy adecuado para construir sostenimientos rígidos, pesados y continuos.



Figura 17.13; Sostenimiento de la galería mediante cerchas y placas metálicas (Santamarta J, 2008)

c) Problemas de aparición de lajas y prismas de retracción.

En este caso, se atraviesa una formación donde el macizo rocoso está en forma de lajas (láminas), que van cayendo poco a poco, hasta formar una grieta, que puede comprometer la estabilidad de la galería. Por esta fisuras pueden aparecer flujos de agua que empeoran la situación.

La solución en este caso está orientada a la ejecución de cerchas y *chapas metálicas tipo BERNOLD*.

El otro problema de estabilidad de la galería ocurre cuando aparecen diaclasas *de retracción*, típicas del enfriamiento del magma, que aíslan prismas más o menos hexagonales, susceptibles de caer por gravedad. Puede darse el caso que en el avance de la perforación se encuentren estos prismas; en las zonas laterales no dan

problemas geotécnicos de importancia, pero en la clave pueden llegar a provocar importantes problemas de estabilidad, lo que obligaría a adoptar las medidas de contención pertinentes (generalmente bulonado). También pueden generar fisuras o grietas, creando así una vía preferencial de circulación del agua del acuífero.

La solución a este problema es muy cara y difícil de aplicar, ya que habría que detectar los prismas menos estables, una solución conjunta no es viable.

d) Problemas de descalce de escorias de colada basáltica.

Este problema geotécnico se puede calificar de bastante grave. Ocurre cuando en una perforación se comienzan a retirar escorias de base de la colada, descalzando al nivel de compacto masivo de la misma, afectado por el diaclasado de retracción y creando una inestabilidad, que incluso puede llegar a afectar a edificaciones en superficie (este caso ya se dio en la ejecución del túnel del trasvase en la isla de La Palma). Este hecho es favorecido por buzamientos en contra de la traza.

La solución a este problema es bastante compleja, debido a que se debe estabilizar el frente; una posible solución es mediante gunitado e inyecciones de lechada de cemento, conjuntamente con la ejecución de pórticos a modo de cerchas.

e) Fluides de materiales plásticos.

En ocasiones los depósitos piroclásticos alterados evolucionan a materiales plásticos de tipo arcilloso; éstos, con la presencia de agua, pueden magnificar sus propiedades plásticas y expansivas. Durante los procesos de excavación de la galería en este tipo de formaciones, se producen fenómenos de convergencia importantes.

En este caso se puede recurrir a dos soluciones: Una antieconómica pero efectiva, que es sostener la perforación mediante un anillo de hormigón armado de espesor mínimo de 1 metro con acero de redondos del 34; otra solución es la de incluir en la excavación un tubo, que los materiales plásticos rodearían, pero si este tubo siempre está lleno a sección completa y con unas características mecánicas óptimamente calculadas no tiene que dar problemas de colapsabilidad.



Figura 17.14: Rotura de chapa tipo Bernold por fluidez de materiales plásticos saturados (Hernández, L.E., 2012).

Bibliografía consultada y referencias

- BIENIAWSKI, Z. T. (1989). *Engineering Rock Mass Clasifications*, pp 1-251. John Wiley.
- CONSEJERÍA DE OBRAS PÚBLICAS, TRANSPORTES Y POLÍTICA TERRITORIAL DEL GOBIERNO DE CANARIAS (2011). *Guía para la Planificación y la Realización de Estudios Geotécnicos para la Edificación en la Comunidad Autónoma de Canarias*.
- HERNÁNDEZ, L. E., RODRÍGUEZ-LOSADA, J. A., OLALLA, C. GARRIDO-MANRIQUE, J., 2010. "Geotechnical investigation guide for building in volcanic environments". En Olalla et al. (Edts): "Volcanic Rock Mechanics". Taylor & Francis Group, London, ISBN: 978-0-415-58478-4. Pág. 249-254.
- RODRÍGUEZ-LOSADA, JA, HERNÁNDEZ-GUTIÉRREZ, LE, OLALLA, C, PERUCHO, A, EFF-DARWICH, A. (2009). "Geomechanical parameters of intact rocks and rock masses from the Canary Islands: Implications on their flank stability". Journal of Volcanology and Geothermal Research 182 (2009) 67-75. doi:10.1016/j.jvolgeores.2009.01.032.
- SANTAMARTA CEREZAL, J.C. RODRIGUEZ MARTÍN, J. (2011); *Sistemas de avance y perforación en la minería de agua dulce en terrenos volcánicos*. Revista Ingeopress Vol. 170. Pag 22-40. Madrid.
- SANTAMARTA CEREZAL, J.C., HERNÁNDEZ L.E., RODRÍGUEZ LOSADA, J.A. (2010). *Volcanic rock mechanics-volcanic dikes engineering properties for storing and regulation of the underground water resources in volcanic islands*. Balkema Ed. Países Bajos.
- SANTAMARTA CEREZAL, J.C (2009); *La minería del agua en el archipiélago canario*. De Re Metallica. Sociedad Española para la Defensa del Patrimonio Geológico y Minero. Madrid.
- SANTAMARTA CEREZAL, JC. (2009) *Singularidades sobre la construcción, planificación y gestión de las obras y recursos hídricos subterráneos en medios volcánicos. Estudio del caso en las Islas Canarias occidentales*. Tesis (Doctoral), E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos (UPM) [En línea]. Universidad Politécnica de Madrid 2010, [ref. de 15 Octubre 2010]. Disponible en Web: <http://oa.upm.es/3389/>
- SOLER LICERAS, C. (2004); *Obras Hidráulicas*. Notas para la asignatura Obras y aprovechamientos hidráulicos. Universidad de La Laguna. Inédito Tenerife. 98 p.

Obras hidráulicas y materiales constructivos en terrenos e islas volcánicas. El ejemplo canario

Francisco Suárez Moreno
Juan Carlos Santamarta Cerezal

1. Introducción, los materiales constructivos utilizados en Canarias

Los materiales utilizados en las islas para la construcción en general y para la realización de obras hidráulicas han tenido, lógicamente, como materia prima materiales de origen volcánico en consecuencia con el origen geológico insular así como de sus procesos geomorfológicos-erosivos y los provenientes de sus recursos naturales como los bosques.

En un principio fueron la piedra (labrada o no), la cal, el barro y la arena junto a las maderas los materiales básicos; luego se introduce el cemento portland de importación y más tarde los cementos canarios así mismo se emplea el lapilli o picón como aglomerante tanto para muros de grandes estanques y presas como para la fabricación de bloques que determinan unas características térmicas y acústicas importantes.

Los primeros materiales utilizados en las obras hidráulicas fueron los utilizados para realizar canalizaciones para derivar el agua que corría por los barrancos a los centros de consumo, esos canales eran contruidos por bloques, mampostería y madera (este último sobre todo en La Palma) así como para la construcción de pequeños estanques o albercas reguladoras.

Otros elementos hidráulicos como molinos de salinas o harineros en su caso emplearon, aparte de los materiales mencionados, la madera local y el hierro de importación. Por citar algunos ejemplos lo hacemos con los artilugios de las salinas de Janubio (Lanzarote) o las de Cabo Verde. En los ingenios hidráulicos harineros, muy bien representados en cantidad y calidad de construcción en Canarias y Azores, destacamos el elemento de las piedras o muelas molineras hechas de un material específico volcánico.

Para las conducciones se han utilizado en tiempos recientes desde fibrocemento, aceros, fundición hasta los materiales más modernos como las tuberías plásticas.

En las presas también han conjugado diferentes tipos de material como, entre otros, mampostería de elementos diversos, materiales sueltos, hormigón...

Dentro de estos materiales, también hay que incluir los utilizados para impermeabilizar los muros y depósitos (telas asfálticas, cal, etc. así como los materiales utilizados para impermeabilizar balsas (PVC, caucho-butilo, etc.), es curioso recordar que las primeras impermeabilizaciones en charcas en la isla de El Hierro se utilizaba la resina de pino mezclada con arcilla, así por ejemplo impermeabilizaron los antiguos guanches las pocetas alrededor del árbol Garoé.

El hormigón armado, ya en tiempos actuales, se ha utilizado en puentes que atraviesan barrancos, acueductos, dados de sujeción de sifones y conducciones.

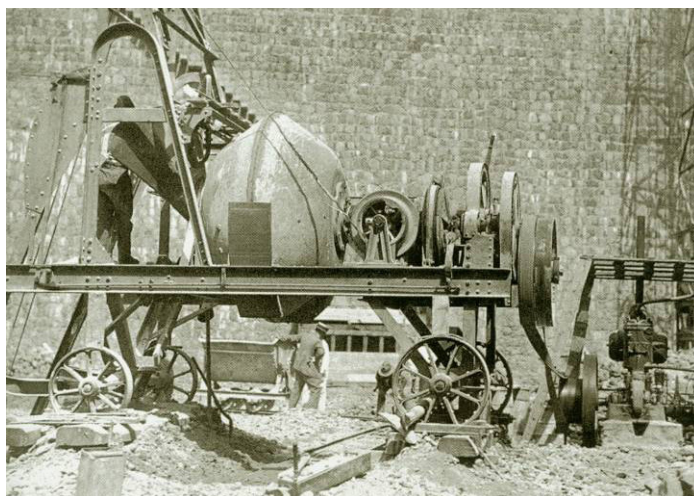


Figura 18.1: Construcción del embalse Charca de Ascanio, 1929, en La Orotava (Tenerife), con el empleo de nuevos materiales y maquinaria de construcción. (fotografía del libro *Trabajadores*, A. O'Shanahan, Ed. Idea, 1995)

2. Materiales tradicionales canarios de construcción para obras hidráulicas tradicionales

Canarias ha desarrollado peculiares ingenierías y arquitecturas hidráulicas, con el empleo mayoritario de materiales propios, porque el comportamiento geomorfológico insular ofreció variados materiales para las obras de fábricas hidráulicas, mientras que el ingenio popular fue generando una tecnología propia. En efecto, rocas y otros materiales volcánicos canarios así como los elementos resultantes de su largo proceso erosivo o de transformación química (coluviones, gravas, arenas aluviones, caliches y arcillas), han propiciado un conjunto de materias primas tradicionales para la construcción de obras hidráulicas (Suárez M. 2001).

2.1. Piedras, lajas, cantos y sillares

El material base de toda construcción canaria es la piedra. Su abundancia en la Naturaleza canaria ha determinado que, desde los primeros asentamientos aborígenes, sea un material de construcción por excelencia. La encontramos compacta en las coladas volcánicas que conforman cada isla o en los diques y pitones verticales, para cuya extracción se ha necesitado el proceso tecnológico de la cantería. Las canteras y las piedras sueltas son de diferentes formas y naturaleza según sea su origen, formación volcánica y proceso erosivo. Encontramos en Canarias dos tipos canteras: las de coladas y diques volcánicos (elementos duros, compactos y pesados), que genera una “piedra viva” y las de materiales fragmentarios compactos (tobas sálicas e ignimbritas) ligeros pero muy duros, que aportan una “piedra muerta”, denominaciones populares.

El primer conjunto de canteras, muy extendido por las islas con el nombre de *pedreras*, generan materiales pesados y difíciles de labrar pero excelentes para muros de contención con o sin argamasa empleados, con diferentes tamaños, en la construcción de tanques y presas. De este tipo de rocas masivas hay unas canteras de planchas volcánicas antiguas de disyunción laminar (fonolitas), de las que se extraen unas lajas sonoras de variada dimensión, muy utilizadas en la construcción de *tageas/atargeas, canales, minas*, etc. En las canteras de ignimbritas encontramos materiales tan duros que, a simple vista, parecen rocas masivas y no lo son, los que por las cualidades de su corte, resistencia al paso del tiempo y buen efecto ornamental se emplean en la construcción, tanto en forma de cantos y sillares como en la configuración labrada o en su caso tallada. Se encuentra sobre todo en Gran Cana-

ria y en Tenerife pero su mejor ejemplo es la “piedra azul” de Arucas, paradigma de la cantería canaria, empleada en numerosas obras hidráulicas (presas, cantoneras, tanques, pozos, pilares, etc.).



Figura 18.2; Piedra molinera de basalto en molino hidráulico en las isla de Terceira (Azores).
(Santamarta JC, 2011)



Figura 18.3; Presa de La Marquesa de Arucas y puente, contruidos básicamente con sillares de *piedra azul* del lugar. (Suárez, 2005)

Las canteras de mantos de cenizas volcánicas, las tobas blancas o “toscas”, aportan un material pumítico-puzolámico, compacto, ligero, impermeable, aislante térmico y acústico y de fácil talla; material empleado en la fabricación de cantos y sillares, muy útiles en la hidráulicas, como también se empleo otra piedra más compacta, la “Chasnera”, apreciada en obras arquitectónicas diversas. De estos materiales diferentes encontramos muchos tanques, presas, cantoneras, pozos, pilares y arcos de los acueductos, etc. En otros casos, ya ahuecados los bloques, se han empleado como *canales/caños* de riego con piedras (Sur de Tenerife, Las Toscas).

2.2. Arcillas, arenas, gravas y picones

La arcilla en su mezcla con arenas conforma el barro de la mampostería tradicional para los muros y paredes de cualquier obra de fábrica, entre otras las hidráulicas. La contención del agua de antiguos tanques y albercas, así como los muros de las acequias se hacían con piedra y barro. Antiguamente, en las obras hidráulicas que requerían morteros de fraguado más rápido se le añadía arcilla a la cal para darle a ésta una mayor hidraulicidad, lo que se denominaba como *mezcla real*.

Mención especial de las arcillas en obras hidráulicas son los antiguos estanques o charcas de barro presentes en casi todas las islas con una alta densidad en Arucas y San Lorenzo, los célebres masapés (Jiménez *et. al.* 2008).

La cerámica tradicional tuvo una notable utilidad como elemento hidráulico empezando por los recipientes de agua domésticos aborígenes y tradicionales (gánigos y bernegales) y terminando por los ladrillos o adobes y los atanores o tuberías. En Tenerife y Gran Canaria, los ladrillos de barro cocido se emplearon desde los primeros años de la colonización no sólo para cubrir los suelos sino también para construir depósitos de agua en sardineles, es decir sentados de canto y para revestir el paramento interior de albercones o los pozos.

Otros materiales imprescindibles en la construcción fueron las arenas y gravas, empleadas en los morteros de revestimientos de estanques y aljibes, en la mampostería ordinaria teniendo a la cal como aglomerante para todo tipo de obra hidráulica. Las cenizas volcánicas de carácter granular (picón o lapilli) también se emplearon como aglomerantes para las obras de fábrica hidráulicas. Estos materiales volcánicos también formaron parte de los morteros con la cal y el cemento en los muros de embalses y maretas y en la fabricación de bloques macizos de sillería artificial.



Figura 18.4: Aljibe de mampostería en la isla de El Hierro. (Santamarta JC, 2009)

2.3. La cal hidráulica canaria

Mención especial en las obras hidráulicas requiere la cal. Se fabricaba en hornos especiales a partir de los carbonatos naturales existentes en las Islas, sobre todo de las capas superficiales de *caliches*, rocas calizas y tobas travertínicas, con un 50%, al menos, de carbonato cálcico (Ca CO_3). Los caliches más puros producen un producto muy blanco, *la cal aérea*, que necesita del aire atmosférico para su fraguado y se emplea en los encalados y albeos; en cambio, cuando contiene sílice, producen una cal menos blanca no apta para la construcción doméstica; pero, en cambio, muy requerida en las obras hidráulicas pues fragua muy bien debajo del agua, por lo que se le denomina *cal hidráulica*, empleada con éxito con morteros de diferente composición.

Para las construcciones que precisaban un contacto inmediato y permanente con el agua como acueductos, alcantarillas, fortificaciones costeras, etc. se utilizó hasta principios del siglo XIX el mortero de cal con barro, la mencionada *mezcla real* que, si bien fraguaba pronto por las propiedades de la arcilla, no producía una mampostería resistente. En realidad lo que hacían nuestros constructores no era más que potenciar su hidraulicidad mediante las propiedades de la arcilla, rica en sílice.

Una vez levantada la obra de fábrica de cal con cualquier otro aglomerante, su fraguado mejoraba sensiblemente con la continua humedad o filtraciones a que estaban sometidas estas obras. De ahí que los tanques y presas solían llenarse a medida que se levantaban los muros de contención, según el conocimiento empírico de nuestros constructores.

Los morteros para revestimientos de tanques y aljibes se mezclaba una parte de cal con media de arena y agua, con un trabajoso laboreo y aguada (terciar). Una vez encalado, las superficies en contacto con el agua llevaban varios albeos, los primeros con lechada de cal y cemento y los últimos de cal, a fin de conseguir una capa de mayor dureza. Para la mampostería ordinaria en los muros de contención, la proporción del mortero variaba: una parte de cal por tres partes de arena, grava o picón, con alguna proporción de cemento cuando éste empezó a utilizarse, sin olvidar que el mejor fraguado de la obra de cal se conseguía con bastante humedad. Se trata de una milenaria técnica constructiva del mundo antiguo mediterráneo puesto que el arquitecto romano Marcos Vitrubio aconsejaba (año 23-27 a.C.) para el revestimiento de pozos con mampostería ordinaria: «cal lo más enérgica posible para la mezcla del mortero, que se compondrá de cinco partes de arena por dos de cal».

2.4. El cemento canario

A finales del siglo XIX comienza a llegar a Canarias el *cemento portland*, importado de Inglaterra en barricas de madera. Pero su carestía determinó un empleo muy limitado del cemento frente la cal canaria, más económica y excelente en las obras hidráulicas. A medida que la infraestructura se complicaba con nuevos tanques, presas y canales, se fue utilizando cada vez más como aglomerante de los morteros para revestimientos y muros de contención.

Tras la crisis de la posguerra (1950-1960) el sector industrial de la construcción canaria en expansión por el crecimiento económico (en el contexto económico de las exportaciones agrarias y el I Plan de Desarrollo español), apostó por la fabricación de cementos especiales, pues disponía de una rica materia prima, en las canteras de tobas puzolánicas de Gran Canaria y Tenerife y de las arenas cálcicas de Lanzarote y Fuerteventura. Al efecto se levantan las fábricas de cementos especiales de Arguineguín (Gran Canaria, 1955) y Cueva Bermeja (Santa Cruz de Tenerife, 1957).

Estas fábricas cubren de inmediato la demanda del mercado interior en progresivo auge primero con las obras urbanas y agrícolas y luego con el *boom* de la construc-

ción turística. Y ello supuso el apagado definitivo de todos los hornos de cal de las islas y el empleo absoluto del cemento como aglomerante de los morteros para cualquier tipo de obras, en especial las hidráulicas (presas, tanques, canales, etc.).



Figura 18.5; Vista parcial de un kilómetro de acueducto en el barranco de Fátaga (Gran Canaria). Extraordinaria obra realizada con “piedra seca y viva” basáltica, sin argamasa alguna. (Suárez F, 2005)

Un capítulo importante en las construcciones hidráulicas canarias es la fabricación de canales y tuberías de cemento para conducciones kilométricas, en la primera mitad del siglo pasado en el contexto de la agricultura de exportación. En la costa de Gáldar, hacia 1930, el célebre empresario inglés David J. Leacock, innovador donde los hubo en la hidráulica canaria, instaló una fábrica de tubos de cemento que se elaboraba con una argamasa de *cemento portland* y arena, fraguado en un molde circular con un entramado de alambres de hierro y aún son conocidos como “las tuberías de Mrs. Leacock”.

En los revestimientos interiores de tanques y aljibes, al vaciarse podían sufrir dilataciones y por consiguiente aparecían fracturas. Estas fracturas solían cubrirse con *cemento portland*, cal y conchas de lapas o de burgados. En aljibes de Lanzarote hay casos donde se llega a cubrir casi todo el revestimiento con un denso incrustamiento de conchas y burgados (Perera, 2000). En Canarias también se empleó el *zulaque*, betún impermeabilizante a modo de pasta hecha con cal o cemento, grasa animal y otros componentes.



Figura 18.6: Acueducto de los Tres Ojos (Telde). En su construcción se emplea mampostería ordinaria de cal, arena y piedras y sillares de dos composiciones distintas procedentes canteras cercanas de mantos ignimbríticos. (Suárez F, 2005)

Bibliografía consultada y referencias

- BENÍTEZ PADILLA, S. (1959): *Gran Canaria y sus obras hidráulicas*. Las Palmas. Castro Núñez, U. (2007): “El Calabazo”, en revista digital bienmesabe.org. nº 175, 9 de Septiembre de 2007 (c. 11-IX-2011):
<http://www.bienmesabe.org/noticia/2007/Septiembre/el-calabazo>
- GONZÁLEZ GONZÁLEZ, J.J. (2005): *Tengamos agua y lo tendremos todo. Las grandes presas de Gran Canaria*. II Congreso Nacional de Historia de las Presas. Sociedad Española de Presas y Embalses. Ministerio de Medio Ambiente, Burgos. http://bdigital.ulpgc.es/digital/texto/pdf/0314959_00000_0000.pdf.
- HERNÁNDEZ GONZÁLEZ, M. (2001): “Labores canarias de piedra en América (las destiladeras y las acequias)”, en *El Pajar. Cuadernos de Etnografía Canaria*, nº 9, pp. 134-137. La Orotava. Santa Cruz de Tenerife.
- HERNÁNDEZ MARTÍN, F.M. (2011): *Apuntes sobre el Patrimonio Etnográfico de Tenerife*. Asociación Cultural “Pinolere. Proyecto Cultural”. La Orotava. Tenerife. «Cap. IV. El Patrimonio Hidráulico. Arquitecturas del Agua», pp. 72-121».
- JIMÉNEZ MEDINA, A. M.; ZAMORA MALDONADO, J. M. y HERNÁNDEZ PADRÓN, A. de J. (2008): “De barro eres y en barro te convertirás: los estanques de barro en Arucas, Gran Canaria. Un acercamiento a la infraestructura hidráulica de finales del siglo XIX y comienzos del siglo XX”, en *El Pajar. Cuaderno de Etnografía Canaria*, nº 26, pp. 80-91. La Orotava. Santa Cruz de Tenerife. LIRIA RODRÍGUEZ, J.A. (2003): *El agua en Gran Canaria*. Jóvenes Agricultores, Las Palmas de Gran Canaria.
- LORENZO TENA, A. (2010): *Molinos de Agua: historia de los ingenios hidráulicos harineros de La Palma*. Ediciones Idea. Santa Cruz de Tenerife.
- PERERA BETANCORT M. A. (1999 y 2000): “La memoria del agua en Lanzarote” I y II, en *El Pajar Cuadernos de Etnografía Canaria*. Pinolere, nº 6 y nº 7. La Orotava. Santa Cruz de Tenerife.

- PERERA BETANCORT M. A. y HERNÁNDEZ GUTIÉRREZ, A. (2006): "Agua e ingeniería popular" en *La cultura del agua en Lanzarote*. Consejería de Obras Públicas y Transportes del Gobierno de Canarias-Cabildo de Lanzarote. Islas Canarias, pp. 217-268.
- SÁNCHEZ VALERÓN, R (2011): «Aljibes de las medianías de Ingenio, patrimonio etnográfico de gran valor», en *El Pajar Cuadernos de Etnografía Canaria*. Asociación Cultural "Pinolere Proyecto Cultural", nº 29, agosto de 2011, pp. 217-220.
- SANTANA, F. (1992) *Castellán Aquae (Atarjeas, cantoneras)*. IV Feria Iberoamericana de Artesanía. Cabildo de Gran Canaria.
- SUÁREZ MORENO, F. (2001): "La piedra, la cal y otros materiales en la ingeniería hidráulica canaria", en *El Pajar. Cuadernos de Etnografía Canaria*, La Orotava, pp. 84-93. Santa Cruz de Tenerife
- SUÁREZ MORENO, F. y SUÁREZ PÉREZ, A. (2005): *Guía del Patrimonio Etnográfico de Gran Canaria*. Cabildo de Gran Canaria. Las Palmas de Gran Canaria.
- SUÁREZ MORENO, F (2007): "El Patrimonio Hidráulico en Canarias", en *Arquitecturas, Ingenierías y Culturas del Agua*, INCUNA, Asociación de Arqueología Industrial. Colección "Los ojos de la memoria", Gijón. Asturias, pp. 173-192.
- VITRUBIO, M.L. (Edic. 1997): *Los Diez Libros de Arquitectura*. Editorial Iberia, Barcelona.

Gestión y planificación de los recursos hídricos en los sistemas insulares de la Macaronesia.

La singularidad canaria

Juan Carlos Santamarta Cerezal
Francisco Suárez Moreno

1. Los tipos de sistemas insulares

Las islas conforman sistemas aislados en todos los sentidos incluidos los recursos hídricos. A lo largo del globo terráqueo existen infinitud de sistemas insulares, cada uno de estos archipiélagos o islas singulares, presentan unas singularidades particulares a la hora de aprovechar, planificar y gestionar los recursos hídricos.

Las islas según su origen pueden ser; *volcánicas*, como por ejemplo Canarias, Hawái, Galápagos, Fiji, Azores, Cabo Verde... en este caso generalmente se conforman con grandes altitudes y su permeabilidad, entre otros factores, viene condicionada por la edad de sus materiales y su secuencia de formación. Generalmente tienen un único acuífero basal conjuntamente con acuíferos colgados debido a capas impermeables de materiales, como los paleosuelos, los llamados *almagres* en Canarias, también se puede dar el caso de la formación de importantes potencias de ignimbritas soldadas que también funcionan como estructuras impermeables. El efecto de la interface agua salada agua dulce en la costa es más sensible a perturbaciones, sobre todo debido a la sobreexplotación del acuífero costero. En una isla volcánica, como norma general sus acuíferos están sobre elevados debido al efecto de los diques geológicos, aunque según qué autores, estas estructuras geológicas pueden condicionar el movimiento del agua vertical o bien actuar como vías preferentes

del movimiento de las aguas subterráneas. Hay que tener en cuenta también en el movimiento del agua las fisuras y las grietas en los macizos así como el buzamiento de las coladas.

Puede darse el caso de modelos mixtos como la isla de Sicilia con una parte volcánica (con aprovechamiento, en algunos casos por galerías de agua como en el caso de Canarias, incluso con regulación por cierres de los diques) influenciada por el volcán Etna – en activo actualmente- y otra de tipo sedimentario, con los procedimientos habituales de aprovechamiento hidráulico.

Las islas volcánicas, en general, desde su formación pasan por una serie de estadios que son:

- Evolución submarina.
- Erupciones subaéreas.
- Alcance de la superficie de mar.
- Progreso de las erupciones superficiales.
- Construcción edificio insular.
- Estadio de Caldera.
- Post- caldera.
- Proceso de erosión y desmantelamiento.
- Proceso de sedimentación costera.
- Deslizamientos.
- Vulcanismo residual.
- Erosión.

Las islas de *origen calizo*, son las típicas que se pueden encontrar en el mar Mediterráneo como Malta, Baleares... son islas de tipo plano, sin grandes altitudes como las volcánicas y notablemente desmanteladas por los procesos erosivos, las permeabilidades son en general bajas. En este tipo de islas es habitual encontrar varios acuíferos, que pueden ser aislados o interconectados entre sí. Los acuíferos suelen ser de origen kárstico y la erosión de las islas es debida a la influencia del mar, con periodos a lo largo de la historia de inmersión por parte de las aguas marinas. También existen acuíferos colgados debidos a la formación de capas impermeables por ejemplo en el caso de la isla de Malta debido a las arcillas azules (*blue clay*).

2. Disponibilidad de recursos hídricos en una isla

La definición adoptada por la UNESCO en 1991 define como islas pequeñas, aquellas que; tienen un área cuyo es menor de 2.000 kilómetros cuadrados y el ancho no excede de 10 kilómetros. La definición también introduce el concepto de “islas muy pequeñas”, donde se incluye a las islas cuya superficie no supere los 100 kilómetros cuadrados o el ancho no sea mayor de 3 kilómetros, en estos dos casos comentados, generalmente hay escasez de agua y no hay recursos hídricos superficiales como norma general.

Las islas europeas y las pertenecientes a la zona de la Macaronesia tienen una serie de características comunes que en general se pueden resumir en los siguientes puntos;

- Recursos hídricos superficiales escasos en general.
- Recursos hídricos subterráneos sobreexplotados, minería del agua fósil, captación de aguas con exceso de flúor.
- Fenómenos de intrusión marina importantes.
- Sobrepoblación.
- Poblaciones concentradas en la zona de costa.
- Intensidad en cultivos agrícolas con gran demanda de recursos hídricos.
- Turismo estacional masivo (en Canarias es repartido durante todo el año aproximadamente 10 millones de turistas anuales), con elevada demanda de recursos hídricos (se toma 500 L por habitante y día).
- Contaminación importante del acuífero, principalmente por nitratos e intrusión marina.
- Necesidad de tomar la isla en su conjunto como una unidad hidrográfica no por cuencas como en el caso continental.
- Dificultad para disponer de datos fiables de las variables hidrometeorológicas. Existencia de microclimas.

- Dependencia energética del ciclo hidrológico insular (binomio agua-energía), en algunos casos dependencia total de la desalación de agua de mar para satisfacer la demanda, como es el caso de Malta, Lanzarote, Cabo Verde...
- Ausencia de cursos continuos en general salvo casos puntuales como Hawái o Azores debido a su mayor pluviometría, en algunos casos superior a 2.000 mm por año.

En otro sentido en los sistemas insulares, las características hidrológicas vienen definidas, entre otros, por los siguientes condicionantes.

- Clima.
- Morfología y altitud media de la isla.
- Geología.
- Edad de los materiales que conforman la isla.
- Hidrogeología.
- Tipos de suelos.
- Tipo de cubierta forestal y vegetal, porcentaje de fracción cabida cubierta (fcc).
- Territorio ocupado por los habitantes, urbanización.
- Usos del suelo (agricultura).

Las precipitaciones juegan un papel importante, en el sentido de su disponibilidad, cantidad y variación en el tiempo. Las precipitaciones también vienen condicionadas por la morfología de las islas, ya que pueden cambiar su patrón y su variación temporal, también influyen en la escorrentía, favoreciendo la misma, cuestión que es difícil que ocurra en islas más planas y con menos altitud.

La altitud de las islas y la presencia de vientos alisios, hacen que ocurra otro tipo de precipitación, de tipo convectiva, que en Canarias es conocida como la precipitación de niebla o *lluvia horizontal*, ya se ha comentado el efecto tan importante en la infiltración y en la recarga de los acuíferos que sugiere este tipo de precipitación.

La hidrogeología de una isla sugiere la distribución, cantidad y calidad de los recursos subterráneos. Estos recursos se ven favorecidos por la permeabilidad innata inicial que poseen algunos materiales volcánicos así como la edad de la isla. Esto también se ve reflejado en la existencia o no de barrancos provocados por la escorrentía del agua y la erosión hídrica que posteriormente generan el desmantelamiento de la isla. No disponer de estos cursos de agua en forma de barrancos a lo largo de la geografía de la isla sugiere una mayor infiltración en el terreno y por tanto mayor disponibilidad de agua, que podrá ser aprovechada mediante las técnicas comentadas (galerías, pozos y sondeos).

3. Limitaciones de un sistema archipiélago en relación a sus recursos hídricos

Se puede hablar de planificación hidráulica en una isla cuando esta tiene suficiente extensión o territorio, como para poder generar sus recursos hídricos y por ende, planificarlos y gestionarlos, en esta definición no cabrían las pequeñas islas que no pueden desarrollar un asentamiento poblacional continuo por ausencia de recursos hídricos estables, un ejemplo puede considerarse las Islas Salvajes en la Macaronesia pertenecientes a Portugal.

Particularizando en las Islas Canarias, sus principales características como medio insular son; la fragmentación del territorio, esto condiciona cualquier proceso de desarrollo y, además lo hace con efectos obstaculizadores, cuando no plenamente negativos. Así, en la explotación global de recursos hídricos es difícil que se pueda llegar a un balance de equilibrio; a un sumatorio total de entradas y salidas igual a cero, por cuanto la división del medio físico compartimenta las actividades, casi exclusivamente, dentro del ámbito de cada isla, cuando no fuerza la escala y especializa diversas zonas de cada territorio insular.

A la hora de gestionar los recursos hídricos en estas islas hay que tener en cuenta los siguientes factores otros autores indican (Vera, et. al, 2004):

- Alta densidad de población en relación con los recursos disponibles en general.
- Importante sector turístico establecido o emergente en algunas de las islas.
- Sector agrícola de relativa importancia económica.

- Fragilidad y exclusividad de los ecosistemas.
- Origen volcánico que condiciona la complejidad del subsuelo y la orografía del Terreno.
- Sistemas cerrados y aislados en lo que se refiere a la gestión del agua.

A estos epígrafes podríamos añadir los siguientes; la irregularidad de las precipitaciones en función de la latitud y orografía de las islas, la incorporación de la precipitación horizontal o de niebla al balance hidrológico de las islas muy importante en cantidad, una evaporación global cuantiosa, el efecto de la cercanía del mar en el contenido de cloruros y por último problemas importantes en los acuíferos costeros por la permeabilidad de los materiales que por la sobreexplotación de los pozos y sondeos, se produce la intrusión marina. En el sentido de las dotaciones de recurso, un aspecto importante es el turismo; un turista puede llegar a consumir de media una dotación de 500 L/día, por ello este dato hay que tenerlo en cuenta en el balance global de la planificación hidrológica.

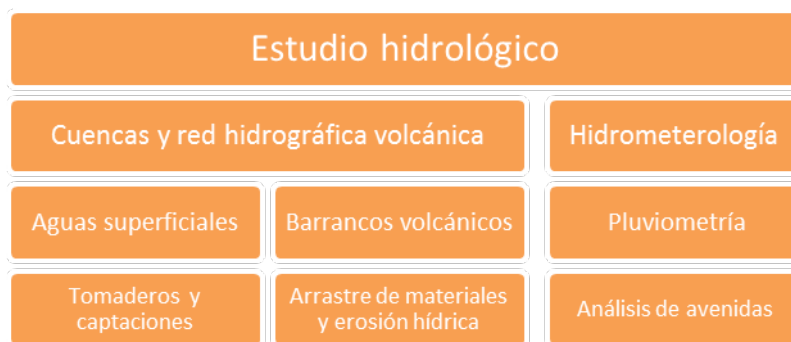


Figura 19.2: Aspectos a tener en cuenta en la gestión hidrológica de un sistema insular. (Santamarta JC, 2008)

4. La planificación del agua en Canarias

Hasta tiempos muy recientes no hubo una planificación de los recursos hidráulicos así como de sus estrategias de captación que siempre estuvieron a la libre disposición de regantes y de los mercados capitalistas del agua donde estos surgieron, sometido además a cientos de litigios que en el caso de Canarias, desbordaron sus tribunales de justicia y derivaron a los superiores del Estado desde los dilucidados

en la Chancillería de Granada, con el pleito de la famosa Mina de Tejeda, en el siglo XVI hasta los tantos de pozos y galerías en Tribunal Supremo a lo largo del siglo XX.

Una de las tendencias en materia de aguas hasta hace 30 años en Canarias, era aumentar la dotación del agua mediante los aprovechamientos disponibles, sin tener en cuenta la propia limitación ambiental ni económica ya que esos recursos eran necesarios a toda costa y eran la base del desarrollo económico insular, el medioambiente era una cuestión sin peso en la toma de decisiones en materia hidráulica, la demanda era alta y se pagaba lo que fuera. Actualmente y con las nuevas normativas en vigor como la *Directiva Marco del Agua*, se tiende a realizar una gestión desde la demanda primando la garantía y eficiencia en el recurso hídrico.

La planificación del agua en una isla se hace mediante el *Plan Hidrológico Insular* (PHI) que es el instrumento básico de la planificación hidrológica, destinado a conseguir la mejor satisfacción de todas las demandas de agua de la Isla.

Hace unos 50 años, los primeros planificadores del agua pensaron en la cuenca hidrográfica como una unidad natural para el estudio de los recursos hídricos en cada zona o área. En el caso de los medios insulares, generalmente se estudia toda la isla como la unidad natural para la organización de los recursos hídricos, o bien se ha delimitado el Norte y el Sur de la isla -por la diferencia climática y de disponibilidad de agua entre ambas orientaciones en las islas-, teniendo que recurrir a trasvases entre ambas caras. En algunas ocasiones se han utilizado las cuencas de los barrancos volcánicos a modo de micro cuenca para el estudio de aspectos singulares como la erosión, las avenidas o las zonas susceptibles de inundación.

En el caso canario mucha de las infraestructuras para la explotación y el aprovechamiento de los recursos hídricos de las islas Canarias, están en manos del sector privado, que fue el que a principios de siglo invirtió recursos en su búsqueda y aprovechamiento, aunque actualmente existen entes dentro de la Administración Pública donde se dirige, en cierta manera, la política hidráulica y la planificación hidrológica, además estas instituciones otorgan concesiones temporales para el uso del agua, estableciendo; punto de captación, caudal autorizado, punto de devolución, calidad del agua en el punto de devolución por lo que también se vigilan los cauces.

De modo general los planes hidrológicos de una isla se conforman de los siguientes apartados;

- Descripción general de la isla (origen, edad materiales volcánicos, geología, deslizamientos, erosión actual, vegetación...).
- Situación hidráulica actual.
 - Recursos hídricos.
 - Usos del agua.
 - Consumo urbano.
 - Consumo industrial.
 - Consumo agrícola.
 - Balance hidráulico.
- Infraestructura hidráulica.
 - Captaciones aguas subterráneas.
 - Balsas y depósitos.
 - Redes de transporte.
 - Desaladoras.
 - Saneamiento y depuración.
 - Estado y mantenimiento general.
- Gestión del recurso (privada, pública).
- Principios, directrices y previsiones de evolución.
- Principios, directrices.
 - Evolución de las demandas.
 - Evolución de los recursos.
 - Balance hidráulico.
- Calidad de aguas (problemas con gases volcánicos, nitratos...)

- Zonificación hidrogeológica.
- Programas de actuación.
- Normativa aplicable.



Figura 19.3; Sistemas de conducciones en Tenerife Sur. (Santamarta JC, 2010)

5. Introducción a los recursos hídricos en la Macaronesia

La región de la Macaronesia, está formada por una serie de cinco archipiélagos (Azores, Madeira, Islas Salvajes, Canarias y Cabo Verde) enclavados en el Atlántico Norte, que tienen en común una serie de factores climáticos, geológicos y ambientales, que las hacen poseer características comunes a nivel de vegetación y recursos hídricos, principalmente, porque son de origen volcánico. Si bien hay una mayor disponibilidad de agua, creciente de Sur a Norte, con una mayor cantidad de precipitación, en las islas Azores (desde 3.000 mm/año) y menores lluvias en Cabo Verde (menos de 200 mm/año); también existe, en términos de precipitación, singularidades en cada una de las islas de los archipiélagos, también influenciada por la orografía y morfología de las islas.

El problema fundamental relacionado con el agua, en esta región del planeta, se puede reducir a las siguientes cuestiones; un territorio insular y volcánico, limitado

en superficie y alejado del continente que ha de abastecer a 3.100.000 habitantes, incluida su agricultura, servicios e industria. Este reto, es una tarea muy difícil y complicada técnicamente. La ingeniería y la geología han tratado de ir estudiando su solución, a través de los años y el avance de la técnica, con cierto éxito pero que en el próximo siglo la comunidad científica y los ingenieros se deberán a enfrentar a nuevos retos hidrológicos y de disponibilidad energética vinculados al agua.

Tabla 19.1; Población en la Macaronesia. (Wikipedia, 2011)

SISTEMA ARCHIPIÉLAGO	HABITANTES
Azores	245.374
Madeira	247.399
Salvajes	2
Canarias	2.103.992
Cabo Verde	499.796
Total Macaronesia	3.095.729

Los recursos hídricos en la Macaronesia se obtienen principalmente del subsuelo; pozos, sondeos, minas y galerías de agua dulce, que son los exponentes más interesantes de este tipo de aprovechamiento, aunque no hay que obviar, que desde hace 50 años hay un auge de la producción industrial de agua sobre todo en islas con menor posibilidad de recurrir al recurso subterráneo y superficial. Los recursos hídricos superficiales, debido a la permeabilidad habitual del terreno volcánico, no son tan abundantes, salvo los aprovechados por tomaderos de barranco, con derivación a balsas impermeabilizadas de almacenamiento; aunque no hay que olvidar, que en dos islas de Canarias (Gran Canaria y Gomera) existen más de 100 grandes presas, siendo este número, la mayor densidad de embalses del mundo como ya se ha comentado en alguna ocasión a lo largo de este libro. En general el agua almacenada por las presas, no se usa para abastecimiento urbano, sólo para agricultura. En el caso de Azores y Madeira, existen lagos que son reservas estratégicas de agua, pero su valor actualmente es ecológico y recreativo.

Los problemas en relación al agua de la Macaronesia son muy similares. La mayor demanda del recurso, en general, viene dada por la agricultura, salvo en Azores, cuya demanda urbana es la mayor demandante de agua con un 56% del total disponible. Otro aspecto importante es la fracturación del territorio lo que provoca que se esté hablando de territorios divididos, con grandes diferencias en la disponibilidad del agua, por diferentes cantidades de precipitación entre las islas, incluso dentro de los propios archipiélagos (La Palma; 700 mm, Fuerteventura; 150 mm). Hay que

sumar también un aumento de la población, así como del turismo masivo (Canarias, 9,6 millones de visitantes, Cabo Verde 382.000 turistas y en aumento progresivo). En este sentido, se puede concluir que; los recursos hídricos pueden ser un factor limitante a la hora de desarrollar el turismo y el desarrollo económico en la Macaronesia.



Figura 19.3; Pozo en la isla de Terceira, Azores. (Santamarta JC, 2011)

La calidad de las aguas extraídas del acuífero es otro factor importante, si las extracciones no son sostenibles (extraer más agua que la recarga natural del acuífero), como es, en muchas ocasiones, el caso de Canarias, el problema del flúor es muy destacado, así como el problema de los nitratos que comparten también Canarias y las Azores, sobre todo donde la agricultura y la ganadería es muy masiva (Azores, 100.000 cabezas de ganado vacuno). En el caso de archipiélagos, cuyos recursos subterráneos han sido agotados o bien devaluados en cuanto a la calidad del recurso hídrico, la demanda hidráulica ha sido suplida por plantas desaladoras donde en algunas ocasiones puede aparecer el problema de la presencia de boro en las aguas producidas. En general, otro problema hidroquímico es el de los bicarbonatos, en el sentido de que empeoran la calidad del agua y pueden llegar a colapsar las conducciones que la transportan.

Tabla 19.2; Estimación del turismo anual en la Macaronesia. (Santamarta JC, 2011)

SISTEMA ARCHIPIÉLAGO	Nº TURISTAS ESTIMADOS
Azores	300.000
Madeira	245.000
Salvajes	500
Canarias	9.600.000
Cabo Verde	385.000
Total Macaronesia	10.530.500

Otro problema en relación a los recursos hídricos, es la vinculación del agua con la energía, en los archipiélagos del Sur de la Macaronesia (Canarias, Cabo Verde), es necesario desalar el agua de mar (coste; 0.6 a 1.25 €/m³), debido a no poder satisfacer toda la demanda mediante los recursos subterráneos y superficiales, en este sentido la economía de escala es muy importante con respecto al coste del agua, a mayor dimensión (producción de m³) de la instalación, menor coste del agua desalada de mar, esto es difícil de lograr en un sistema insular, las plantas, en general son pequeñas.

En la mayoría de los pozos se bombea el agua, por lo tanto es necesario un suministro energético importante; en Canarias hay pozos de hasta 700 m de profundidad (por ejemplo en la zona de Vilaflor en Tenerife). Aunque en general los centros de consumo están en la costa, el agua hay que transportarla a través de una orografía abrupta y singular. Estos bombeos y transportes de agua unidos a la producción industrial del recurso, provoca una importante demanda energética, que en un archipiélago se hace más sensible que en un territorio continental, ya que las islas disponen de unos sistemas de generación eléctrica singulares.

Por lo general, la Macaronesia se abastece energéticamente mediante centrales eléctricas diesel, con un combustible tipo fuel oil, que es un combustible que siempre está en precios elevados, por lo tanto, el coste de producir agua es directamente proporcional al coste del petróleo; por otro lado aunque las energías renovables tienen cierta presencia en Canarias suponen un ínfimo porcentaje, la desalación de agua de mar suplida mediante esta energía, se recuerda que desalar agua de mar, por cada metro cúbico, la energía supone el 30% del total de los costes. Las perspectivas, en la Macaronesia, en este sentido son una política dinamizadora sobre las energías renovables, por ejemplo la energía geotérmica (Azores-Madeira), hidroeléctrica e hidroeléctrica reversible (Madeira-Canarias), solar y eólica (Canarias-Azores-Cabo Verde) y buscar la eficiencia tanto energética como hidráulica.

En los costes asociados al agua en un sistema insular, como el de la Macaronesia, realmente, el usuario no paga el coste efectivo de lo que vale extraer o desalar un metro cúbico de agua incluyendo su impacto en el medio ambiente, sino que paga un precio menor que no cubre costes; el resto es asumido por los diferentes gobiernos insulares, por lo que el isleño no percibe realmente el coste del agua, aunque a favor se puede afirmar; que los insulares consumen por lo general, menos agua que los habitantes del continente, incluso en las Islas Canarias parte del agua desalada es subvencionada por el Gobierno estatal (año 2011, 9 millones de €2012, 4,6 millones de €).

Las islas de la Macaronesia son vulnerables a las precipitaciones excepcionales, por lo que curiosamente, no solo la escasez de lluvias es problemática, sino que también la abundancia de agua genera graves problemas. El régimen habitual de lluvias en estas latitudes es el torrencial, (mucha precipitación en poco espacio de tiempo) esto hace que en las vías preferenciales de drenaje, los barrancos, fluya el agua de manera violenta creando avenidas con elevados caudales punta, deslizamientos en las laderas y taludes así como problemas en la población que ocupa o vive cerca de los barrancos o laderas. Este problema se acentúa tras incendios forestales, habituales en verano, en el caso de Canarias, por lo que a los materiales habituales arrastrados por las avenidas, se les suma el de las cenizas. Con respecto a los incendios recientes estudios afirman que incrementan la escorrentía y los caudales punta en un 30% incluso reducen los tiempos de retorno en 5 años. Por último en zonas donde se ha perdido la cobertura vegetal se inician procesos de erosión; otro gran problema de futuro en esta región unido a los progresivos desmantelamientos de las islas por procesos erosivos.

Otro aspecto fundamental en relación a los recursos hídricos de la Macaronesia, es la precipitación de niebla u horizontal. Esta lluvia que es potenciada y regulada por las masas forestales. Hay criterios dispares sobre su cuantificación (desde 2,5 veces la precipitación normal hasta 1,25 depende del autor que se referencie). Lo que sí es una evidencia, es que complementan el ciclo hidrológico en la Macaronesia, desde Azores hasta Cabo Verde, aunque su aprovechamiento directo es muy minoritario, limitado a casos muy particulares como; el abastecimiento de depósitos para incendios forestales, bebederos de fauna, abastecimientos de alta montaña... Como aspecto positivo, es que este fenómeno ha sido profundamente estudiado en varias islas de la Macaronesia como Madeira, Terceira, Tenerife, Gran Canaria, Hierro... e incluso se han diseñado planes de surtir agua a bebederos por procedimientos mecánicos automatizados, como es el caso de la Reserva Integral de Enagua.

Por último, hay que dar importancia al turismo relacionado con el agua, casos interesantes son los senderos vinculados al agua (rutas del agua, *wáter walks...*), como es el caso en Madeira, La Palma o Tenerife (Canarias), son un recurso turístico interesante y atraen a un turismo de calidad. Una posibilidad de futuro sería el *hidrogeoturismo*, vincular obras hidráulicas singulares al turismo, para su visita e interpretación, por ejemplo lo que se lleva a cabo en la isla de Terceira, con la visita a tubos y cuevas volcánicas puede tener su representación en visitas a minas de agua o galerías en Canarias o Madeira.



Figura 19.4. ; Lago en la isla de Terceira, Azores. (Santamarta JC, 2011)

6. El coste del agua en Canarias

En el coste del agua se refleja todo el conjunto de procesos y recursos necesarios para; captarla desde el medio natural (subterráneo, superficial o procedente del mar), conducirla a las estaciones de tratamiento, transformarla en agua potable, analizar su calidad, distribuirla al consumidor final, conducir el agua utilizada en forma de aguas negras a las plantas depuradoras, depurarla y devolverla al medio natural en el mejor estado posible o bien reutilizarla, si se le aplica un terciario.

TABLA 19.3: Costes de la gestión del agua según su tratamiento o sistema de extracción en la Península Ibérica. (Balaíron L y revisión de proyectos así como entidades de la Administración Pública y elaboración propia, 2012)

COSTE DEL RECURSO HÍDRICO	MÍNIMO COSTE €/m ³	COSTE MEDIO €/m ³	COSTE MÁXIMO €/m ³
Aguas superficiales	0,02	0,085	0,15
Aguas subterráneas	0,06	0,23	0,40
Transporte	0,0006 €/m ³ /Km	0,03 €/m ³ /Km	0,40 €/m ³ /Km
Reutilización	0,15	0,22	0,30
Desalación de aguas	0,60	0,66	0,72

Se pueden establecer unos costes medios aproximados de la obtención de agua mediante las infraestructuras estudiadas. Dentro del marco de las islas occidentales del archipiélago Canario principalmente, se ha revisado la documentación procedente de las Administraciones Públicas así como el estudio de proyectos y explotaciones a lo largo de las cuatro islas occidentales. Establecer un coste orientativo, es una tarea de difícil planteamiento, debido a que en la mayoría de los casos, como se comentó, influye la *economía de escala*.

Si comparamos los costes del agua entre un terreno continental y las islas Canarias (insular) los costes en esta última región son mucho más elevados, debido entre otros aspectos a;

- Bajo rendimiento de las infraestructuras dedicadas a la captación de aguas superficiales.
 - Grandes costes poco recurso interceptado.
 - Problemas de aterramiento por el propio régimen torrencial de las islas.
 - No existen más terrenos competentes para embalsar agua.
 - Los mayores rendimientos se tienen en los tomaderos de barranco.
- Abrupta orografía, grandes desniveles que hacen que las conducciones tengan que salvar barrancos y grandes relieves y pérdidas en las conducciones, complejidad técnica constructiva importante.

- La generación eléctrica en las islas, es mediante combustibles derivados del petróleo lo que hace que los costes energéticos vinculados al agua aumenten considerablemente.
- El agua en los pozos y sondeos hay que bombearla desde profundidades muy elevadas (200-500 m), por lo que los costes energéticos se disparan en los bombeos en serie. Elevados costes de mantenimiento de instalaciones, difíciles accesos.
- Atomización de las fuentes de producción de aguas que muchas veces no coinciden con los centros de consumo.
- Plantas desaladoras con dimensiones reducidas lo que hace que no se sienta en la producción la economía de escala.

Tabla 19.4; Costes de la gestión del agua según su tratamiento o sistema de extracción en Canarias. (A partir de proyectos, entidades de la Administración Pública y elaboración propia, 2012)

Coste del recurso hídrico	Mínimo coste €/m ³	Coste medio €/m ³	Coste máximo €/m ³
Aguas subterráneas (galerías-pozos-sondeos)	0,45	0,50	0,55
Aguas superficiales	0,42	0,52	0,62
Aguas atmosféricas (captadores de bruma)	0,03	0,05	0,10
Desalación de aguas	0,60	0,73	1,70
Desalación de aguas salobres	0,22	0,26	0,31
Depuración de aguas	0,19	0,25	0,32
Reutilización de aguas (terciario a depuración)	0,34	0,40	0,47

7. El coste del agua urbano

Recordando lo comentado sobre el precio del agua en Canarias; lo que paga el usuario final no cubre, en muchos casos, el coste del agua si incluimos la depuración y la externalidad del daño al medio ambiente.

Los precios deberían acercarse a los costes e incluir los imperativos de sostenibilidad y la necesaria adaptación a nuevas normativas europeas. El porcentaje del presupuesto familiar destinado al consumo del agua muchas veces no llega al 1% del total.

Tabla 19.5; Costes del agua Urbana. (INE, 2009) comparado con los costes europeos más elevados.

Lugar	Coste (€/m ³)
Baleares	2,00
Canarias	1,91
Murcia	1,84
Castilla y León	1,07
Galicia	0,93
Copenhague	4,54

En Canarias, sobre todo en las islas orientales (tal vez por el mal sabor del agua del grifo) y en zonas capitalinas está muy arraigado el consumo de agua embotellada, lo que supone un significativo gasto familiar como vemos en este cuadro:

Tabla 19.6; Costes del agua comparada con los combustibles. (Santamarta JC, 2012)

PROCEDENCIA	COSTE EN €/L
Agua del grifo	0,001
Agua en envase de 1.5 litros	0.65
Agua en envase de 0.5 litros	0.50
Gasoil (precio en Canarias,2012)	1.00
Gasolina (precio en Canarias,2012)	1.11

Otro hecho interesante, al hablar de medios insulares, como Baleares y Canarias es el coste de agua, es el más alto de España, siendo esta otra singularidad interesante a la hora de la planificación hidrológica.

Canarias ha tenido una gran tradición de consumo de agua mineral por su riqueza de fuentes especiales algunas con la denominación de fuentes santas y curativas; esto hizo que se generaran industrias de embotellado de *agua agria*, que daría paso en el siglo XX a muchas industrias de agua embotellada. Actualmente esta agua envasada procede de generalmente de galerías, que es la misma procedencia que la de abastecimiento, pero aquella no tiene postratamiento, aunque hay un porcentaje pequeño de agua envasada que procede de manantial. Este mercado se distribuye de la siguiente manera:

Tabla 19.7; Distribución del agua envasada en Canarias, comparación de manantial con galería (ANABE, 2008)

	2005		2006		2007		2008	
	LITROS	CUOTA	LITROS	CUOTA	LITROS	CUOTA	LITROS	CUOTA
MINERAL NATURAL	260	62,13%	273	62,92%	260	58,88%	276	58,82%
MANANTIAL	129	30,91%	121	27,73%	113	25,66%	118	25,14%
POTABLE PREPARADA	29	6,96%	41	9,35%	68	15,47%	75	16,04%
TOTAL CANARIAS	419	100%	435	100%	442	100%	469	100%

Sobre el agua de manantial, que básicamente es una perforación horizontal donde antes había una fuente, buscando el curso del agua subterránea, según la asociación ANABE se pueden hacer las siguientes afirmaciones.

- *Canarias es el último reducto del agua de manantial en España desde el 2005, en Canarias se ha vendido el 80% de todo el agua de manantial vendida en España, y el 85% en el 2008.*
- *El casi absoluto dominio de las aguas minerales naturales ha promovido que el consumidor perciba a las aguas de manantial como aguas de segunda, y no pueden competir en precio con las minerales naturales.*

Los costes de abastecimiento de agua potable para los usuarios insulares son los más elevados del país, esto no quiere decir que sean los de mayor calidad, ya que un porcentaje muy elevado de los usuarios recurren a aguas envasadas generando un mercado y un negocio en continua expansión, es indiferente la procedencia de esas aguas, aunque en muchas ocasiones provienen de las propias captaciones por donde se abastece a las poblaciones. Canarias consume el 80% del agua de manantial puesta en el mercado de las aguas envasadas.

Un ejemplo de disparidad de costes se puede comprobar con la isla de Tenerife donde varían desde los 0,38 a 0,49 €/ m³ (Cabildo de Tenerife, 2009) el coste del transporte se factura a parte y se establece en función del tipo de canal o situación del mismo estando los costes en una horquilla que va de los 0,08 €/ m³ a los 0,04 €/ m³, el almacenamiento de agua por parte de una balsa también tiene un coste determinado por el Cabildo de Tenerife establecido en 3,25 € por cada 1.000 m³ y día, como resumen se adjunta la siguiente tabla;

Tabla 19.8; Coste del agua en la isla de Tenerife procedente de las balsas (Cabildo Tenerife, 2009)

	Suministro aguas blancas	Suministro agua depu- rada	Transpor- te de agua	Almacenada
máxi- mo	0,63 €/m ³	0,55 €/m ³	0,08€/m ³	3,25 €/1000 m ³ /día
mínimo	0,38 €/m ³	0,22 €/m ³	0,04 €/m ³	3,25 €/1000 m ³ /día

Recientemente, en Octubre de 2012 ha habido una subida de precios en los costes por metro cúbico de la empresa Balten, incrementándose un 22%.

8. Los recursos no convencionales en la planificación hidrológica canaria

Los recursos no convencionales (*desalación y reutilización*) en las islas occidentales están teniendo cada vez mayor auge en los planes hidrológicos de las islas, incluso se pueden denominar recursos convencionales, por ejemplo, en las islas de Lanzarote y Fuerteventura el 100% del agua de abastecimiento urbano es de esta procedencia. Estos sistemas de producción industrial de agua aumentan la disponibilidad del recurso, a un precio bastante considerable pero menor que hace 30 años debido a los avances técnicos desde los sistemas antiguos de desalación basados en la desalación hasta los modernos sistemas de osmosis inversa y los sistemas de recuperación de energía. Estos avances técnicos en cierta medida se han visto mermados por los altos precios del combustible, hay que tener en cuenta que también se sacrifica un consumo energético -el comentado binomio agua-energía- que en un sistema aislado y dependiente como es el Canario supone un esfuerzo considerable principalmente económico y a nivel de infraestructuras.

La desalinización de agua de mar es uno de los procesos industriales que más energía consume: por cada metro cúbico desalinizado, las instalaciones necesitan cerca de un litro de combustible, se usan unas 180.000 Tm de carburante diesel al año.

A modo de comparación entre explotación de recursos subterráneos del agua y la producción industrial del recurso, hay que destacar que mientras las plantas desaladoras tienen una vida útil de unos 15 años, las galerías pozos y sondeos pueden llegar a durar más de 100 años.

El rango de costes de la desalación, en las islas occidentales, varía de 0,57 a 1,62 €/m³, los valores más altos corresponden a islas no capitalinas, indicando nuevamente

el factor económico de escala en este tipo de instalaciones. Las plantas desaladoras han aumentado considerablemente la demanda eléctrica en las islas Canarias, un dato significativo es que en la isla de la Gomera con el doble de habitantes que el Hierro se consume menos energía por habitante, utilizando, el Hierro, entorno al 10% de la producción de energía para desalar agua de mar.

Existe un auge de los sistemas híbridos, muchos de estos tipos de instalaciones se han probado ya en Canarias, con relativo éxito si bien, no se utilizan para atender grandes demandas de recursos, aun así, los costes de los equipos suponen un desembolso económico importante y la garantía del 100% de disponibilidad en el abastecimiento puede ser un impedimento; no obstante, en las islas occidentales existe el ejemplo de la central hidroeléctrica reversible de El Hierro la cual plantea suministrar al 100% de las energías renovables del archipiélago incluida la energía demandada por la desalación de agua de mar.

La reutilización del agua en Canarias, ha sido objeto de un estudio científico profundo, a día de hoy no supone una oferta muy elevada (principalmente se usa en regadío), los costes son en cierta manera elevados, más aún si se aplica un terciario (desinfección).

9. Una peculiar singularidad: la gestión tradicional del agua en Canarias a lo largo de la historia

Otra de las singularidades de la cultura del agua en estos archipiélagos ha sido su forma de propiedad y estrategias tradicionales de gestión donde Canarias escribe muchos capítulos desde que tanto de Madeira como de Andalucía, después del siglo XV, se transfieren variadas estrategias que a su vez, por la peculiaridad del territorio y el modelo de desarrollo económico en evolución constante por ciclos históricos, generan transformaciones.

Hasta la aprobación, en 1987, de la primera y muy conflictiva Ley de Aguas de la Comunidad Autónoma de Canarias, la mayor parte de las captaciones de aguas manantes, pluviales o subterráneas eran de propiedad privada, casi siempre estructurada en heredamientos antiguos y comunidades de regantes modernas.

Desde lo más antiguo, en la sociedad indígena canaria en la medida de que, en islas o en zonas de las mismas, se experimenta un crecimiento de la población con un consecuente desarrollo agropecuario para la subsistencia, debió generar algunas

estrategias para la captación, almacenamiento y regulación de las aguas manantes o pluviales en su caso. En efecto en alguna crónica de la Conquista de Gran Canaria, como es el caso de la de Sedeño revela que «en las tierras que plantaban de riego recogían el agua en albercas y la repartían con buena orden (Morales P, 1993).

En un principio de la Colonización europea, entre finales del siglo XIV y todo el siglo XV, el agua se repartió por parte de los gobernadores de las islas realengas (Gran Canaria, Tenerife y La Palma) entre los financieros, militares y colonos (la sociedad indígena quedó desposeída de todos los medios de producción como perdedora). Una asignación muy específica pues las aguas que venían desde la cumbre por las redes naturales quedaban vinculadas a los lotes de tierras repartidas (que habían de cultivarse preferentemente de caña dulce para los nuevos ingenios azucareros), las denominadas *datas*.

De esta forma, según pasa el tiempo, el agua de cada barranco o cuenca hidrográfica canalizada a través de una acequia principal y otras secundarias correspondía, por regla general, a un *heredamiento* antiguo, preexistente desde los primeros repartos de tierras y aguas. Pero luego se fue desintegrando el binomio tierra-agua, en la medida de que el mismo se fraccionaba por heredamientos y ventas.

Las primeras ordenanzas municipales de las islas realengas que regulaban dichos heredamientos o heredades, se adaptaron a una progresiva privatización del agua. Y es que, con el tiempo, dichos caudales, que bajaban desde medianías y cumbres hasta las tierras de regadío de la costa, se fueron desligando de la misma en la proporción que tenía cada partícipe o regante. Quedaron como mercancía libre porque la propiedad del agua se fue transmitiendo separadamente de la tierra a la que en un principio estuvo vinculada. E incluso se conformó una especie de justicia privativa en el marco de una modalidad de jurisdicción señorial, amparada en las ordenanzas municipales que recogían la figura de un *alcalde de aguas*, en cada heredamiento principal, para dirimir los muchos conflictos que se generaban (Macías H., 2000 y 2008).

El número de heredades fue en aumento porque aparte de los más antiguos que disfrutaban el agua de los principales barrancos, fueron surgiendo otros nuevos con la construcción de minas y el aprovechamiento de manantiales para el regadío de nuevas tierras, algunos en conflictos con los primeros. A mediados del siglo XIX, José María de León, contabilizó en las islas más húmedas (Gran Canaria, Tenerife, La Palma y Gomera) un total de 104 heredamientos de agua, de los que el 80 % se hallaban en Gran Canaria. Por su historia, número de partícipes, caudales de agua y áreas de riego serían varios a destacar: el heredamiento del valle de La Orotava,

en Tenerife que controlaba el gran Río de Taoro; el de la Vega Mayor de Telde, que disfrutaba las aguas que nacían desde Valsequillo, el de Arucas-Firgas en Gran Canaria...

Con las reformas del liberalismo, en el siglo XIX y luego con leyes de aguas de principios del siglo XX, que consolidaron su privatización, las antiguas heredades se transformaron en comunidades de regantes. O se crearon otras nuevas comunidades, pues la demanda de agua para los nuevos cultivos (cañadulce, plátanos y tomates) determinó la búsqueda de nuevos recursos hídricos con capitales privados en la perforación de pozos y galerías o con la construcción de presas. Estas nuevas sociedades del agua entraron, muchas veces, en continuos conflictos, con los derechos privados preexistentes de los antiguos heredamientos, sobre todo con los alumbramientos subterráneos (minas, pozos y galerías).

Las heredades de hoy o comunidades de regantes cuentan con un interesante patrimonio hidráulico de acequias, albercones, cantoneras... así como de un valioso patrimonio documental. La heredad más antigua que subsiste es la de *Las Palmas, Dragonal, Bucio y Briviesca* que agrupa seis heredamientos (Vegueta, Triana, Fuente de los Morales, Dragonal, Bucio y Briviesca), desde los primeros años de la colonización con la primera gran obra hidráulica de trasvase en Canarias, la Mina de Tejeda; otras emblemáticas y cargadas de bienes patrimoniales son la *Heredad de la Vega Mayor de Telde* y la *Heredad de Arucas Firgas*.

En el norte de Tenerife estaban, entre otros, los heredamientos *de Icod* y *de La Orotava* que era el más importante y que gestionaba las aguas del gran Río de Taoro. En el sureste, las aguas de los barrancos de Badajoz y del Agua (o del Río), en el término de Güímar, se distribuían por separado hacia distintas propiedades originarias de las primeras datas sin constituir heredades de agua; pero las necesidades del riego aconsejaron a sus usuarios la fusión de ambos manantiales, que se reunieron en 1828 (Cruz García, 1940). Para gestionar las aguas reunidas, primero superficiales y luego extraídas en galerías, se creó la *Sociedad "Río y Badajoz"*, que con algunas reformas se mantiene desde entonces hasta la actualidad. Ambos manantiales surgieron libremente hasta comienzos del siglo XX, en que la apertura de diversas galerías en sus inmediaciones los secó, brotando el agua desde entonces exclusivamente por las excavaciones artificiales.

En La Palma los dos más importantes eran dos: el *Heredamiento de Argual y Tacacorte* que administraba el agua procedente de La Caldera y aprovechada en las fértiles tierras del valle de Aridane y el *Heredamiento de Los Sauces* que gestionaba los caudalosos manantiales de Marcos y Cordero (Navarro *et al.*, 2008).

Entre las comunidades de regantes más modernas destacamos la que se creó, bajo la tutela de Estado, en 1927, tras un viejo litigio socioagrario, en La Aldea de San Nicolás (Gran Canaria), porque estableció en su régimen estatutario, tal como estipuló su correspondiente el decreto ley que la propiedad de la tierra (expropiada por el Estado al latifundismo y vendida a los colonos) iría unida al agua. Con ello se recuperaba la filosofía de las primeras heredades nacidas tras los primeros repartimientos de tierra, tras la Conquista, siendo en este caso los nuevos propietarios los partícipes de la nueva comunidad mientras no se desprendieran de la tierra (Suárez M., 2003).

Existe una prolija literatura de estas heredades y sociedades del agua en Canarias, producto de constantes trabajos de investigación, así mismo algunas cuentan con visitas guiadas para fines culturales como es el caso de la *Heredad de la Vega Mayor de Telde*, la *Heredad de Arucas-Firgas*, la Comunidad de Regantes de La Aldea, etc. Y todas cuentan con un valioso patrimonio tangible de documentación histórica, arquitecturas hidráulicas (acequias, cantoneras, presas, pozos, galerías, minas...) y elementos intangibles de la cultura del agua en la memoria y en la gestión del agua de cada lugar, en la figura de sus acequeros o rancheros, tales como, entre otras, las estrategias de medidas y repartos (dulas).

Bibliografía consultada y referencias

- BAEZA RODRÍGUEZ-CARO, J.; LÓPEZ GETA, J.A. y RAMÍREZ ORTEGA, A. (2001): *Aguas Minerales en España*. «6.6. Aguas Minerales en Canarias». Instituto Geológico Minero de España, Madrid, pp. 185-196.
- BOSCH MILLARES, J. (1947): «Las aguas mineromedicinales de Gran Canaria», en la revista *Isla*, nº 3.
- CABILDO INSULAR DE GRAN CANARIA. Plan Hidrológico de Gran Canaria (2000).
- CONSEJO INSULAR DE AGUAS DE EL HIERRO. (1999). *Plan Hidrológico Insular de la isla de El Hierro*. Tenerife. 205 pág.
- FERNÁNDEZ ARMESTO, F. (1997): *Las Islas Canarias después de la conquista. La creación de una sociedad colonial a principios del siglo XVI*. Ediciones del Cabildo Insular de Gran Canaria. Cap. V. «Las aguas de riego», pp. 153-179. Las Palmas de Gran Canaria.
- FERNÁNDEZ GONZÁLEZ, E.: (1984): «Curiosidades sobre captaciones de agua en Gran Canaria», en *el Campo. Boletín de Información agrícola*. Banco de Bilbao. Bilbao. [Original en Servicio Hidráulico, LAS PALMAS, legajos sueltos de presas, para el congreso].
- GALVÁN GONZÁLEZ, E. (1996): *El abastecimiento de agua potable a Las Palmas de Gran Canaria: 1800-1946*. Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria. Las Palmas de Gran Canaria.
- GÓMEZ GÓMEZ, M.A. (2009): «Aprovechamiento del agua en Canarias durante antiguo régimen» (en línea). (Islas Canarias, España), Mayo 2009 (ref. 10 de Junio 2009), en revista Canarii. Disponible en World Wide Web; <<http://www.revistacanarii.com/canarii/15/aprovechamiento-del-agua-en-canarias-durante-el-antiguo-regimen>>
- GÓMEZ GÓMEZ, M.A. (2006): «La vida en torno al agua. Usos y aprovechamientos históricos», en *Agua del Cielo. Documentos para la Historia de Canarias*. Gobierno de Canarias. Dirección General del Libro, Archivos y Bibliotecas. Archivo Histórico Provincial de Santa Cruz de Tenerife. San Cristóbal de La Laguna.

- GONZÁLEZ NAVARRO, J. (2008): «El patrimonio hidráulico en la prehistoria de Gran Canaria», en *La cultura del agua en Gran Canaria*, Consejería de Obras Públicas y Transportes del Gobierno de Canarias. Las Palmas de Gran Canaria, pp.25-34.
- GONZÁLEZ RODRÍGUEZ, J.M. (1991): “Tecnología popular tradicional de los sistemas de riego en Canarias” en *Anuario de Estudios Atlánticos*, nº 37, pp. 467-497. Las Palmas de Gran Canarias.
- GONZÁLEZ RODRÍGUEZ, J.M. (2010). *El agua en Canarias. Una visión histórica. Catálogo*. Instituto de Estudios Canarios-Instituto de Estudios Medievales y Renacentistas de La Universidad de La Laguna. San Cristóbal de La Laguna.
- LORENZO PERERA, M. J. (2006): “El agua en Canarias. Un negocio doblemente subterráneo”. *Rev. nº 115 de Bienmesabe.org* (consulta: 15 de noviembre de 2009).<http://www.bienmesabe.org/noticia.php?id=12519>
- MACÍAS HERNÁNDEZ, A.M. (2000): “De Jardín de las Hespérides a Islas Sedientas. Por una historia del agua en Canarias, C. 1400-1990” en *El Agua en la Historia de España*, pp. 169-271. Edit. B. López y Melgarejo M. Universidad de Alicante. Salamanca.
- MACÍAS HERNÁNDEZ, A.M. (2008): “Notas sobre la historia del agua”, en *La cultura del agua en Gran Canaria*, Consejería de Obras Públicas y Transportes del Gobierno de Canarias, pp.35-54.
- MACÍAS HERNÁNDEZ, A.M. y OJEDA CABRERA, M.P. (1989) “Acerca de la revolución burguesa y su reforma agraria. La desamortización del agua”, en *Anuario de Estudios Atlánticos* nº 35. Patronato de la Casa Colón-Cabildo de Gran Canaria. Las Palmas de Gran Canaria.
- MORALES MATOS, G. y SANTANA SANTANA, A. (2005): *Islas Canarias. Territorio y Sociedad*. Colección Textos Universitarios. Anroart Ediciones. Las Palmas de Gran Canaria.
- MORALES PADRÓN, F. (1978): *Canarias: Crónicas de su Conquista*. Ayuntamiento de Las Palmas-El Museo Canario. Sevilla.
- NAVARRO GARCÍA, E. (ED.), LÓPEZ GARCÍA, J.S., SANTANA RAMÍREZ, J.I., SUÁREZ ALEJANDRO, P., HERNÁNDEZ ROMERO, F., VIÑA BRITO, A. y ACOSTA PADRÓN V. (2008): *Heredamientos de Aguas de Canarias*, Eduardo Navarro García-Ayuntamiento de Arucas, Arucas.
- NAVARRO GARCÍA, E. y ALONSO DÍAZ, S. (2005): «Aguas minerales de Telde a través de nuestros investigadores e historiadores», en *Guía Histórico Cultural de Telde*, pp. 55-58.
- NAVARRO GARCÍA, E. y ALONSO DÍAZ, S. (2006): «Aguas minerales del Pozo de la Fuente. Santa María de Guía. Gran Canaria», en *Canarias médica y quirúrgica*, septiembre-diciembre de 2006, pp. 62-66.
- NAVARRO GARCÍA, E., ALONSO DÍAZ, S. y SAN MARTÍN BACAICOA, J. (2003): «Resumen histórico farmacológico terapéutico de las aguas minerales de Firgas», en *Canarias médica y quirúrgica*, mayo-agosto 2003, pp. 50-53.
- PÉREZ MARRERO, L. (1990): «El proceso de privatización del agua en Canarias», en *Anuario de Estudios Atlánticos*, nº 36.
- PÉREZ MARRERO, L. (2003): *Patrimonio e Innovación en la obtención y aprovechamiento de recursos hídricos en Canarias*. Ayuntamiento de Arucas.
- PÉREZ, Manuel: “Un siglo de agua, un siglo de vida”. *Rev. nº 1 de Bienmesabe.org* (consulta: 15 de noviembre de 2009). <http://www.bienmesabe.org/noticia.php?id=37>
- RODRÍGUEZ BRITO, W. (1995): *El agua en Canarias y el siglo XXI*. Cabildo Insular de Gran Canaria. Las Palmas de Gran Canaria.
- SANTAMARTA CEREZAL, J.C. (2009) *Singularidades sobre la construcción, planificación y gestión de las obras y recursos hídricos subterráneos en medios volcánicos. Estudio del caso en las Islas Canarias occidentales*. Tesis (Doctoral), E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos (UPM) [En línea]. Universidad Politécnica de Madrid 2010, [ref. de 15 Octubre 2010]. Disponible en Web: <http://oa.upm.es/3389/>
- SUÁREZ MORENO, F. (2003): *La Comunidad de Regantes Aldea de San Nicolás. Historia y estrategias hidráulicas*. 75º Aniversario de Fundación. La Aldea de San Nicolás. Gran Canaria.
- VERA, L M. (1998). *Microfiltración de aguas residuales depuradas. Mejora del flujo de permeado por inyección de gas*. Tesis Doctoral. ULL. Tenerife.



Patrimonio Hidráulico Canario

Francisco Suárez Moreno
Juan Carlos Santamarta Cerezal
Amanhuy Suarez Pérez

1. Introducción al Patrimonio Hidráulico

El patrimonio etnográfico de una región es entendido como el amplio conjunto de bienes muebles e inmuebles y de conocimientos y actividades que son o han sido expresión relevante de la cultura tradicional de un pueblo en sus aspectos materiales, sociales o espirituales; en el caso hidráulico comprendería todo lo relacionado con la cultura del agua en Canarias.

Todo el patrimonio hidráulico canario está interrelacionado entre sí. Así por ejemplo las conducciones y canales de las islas están asociadas a otros elementos como cantoneras, lavaderos, molinos, presas, tomaderos, casillas, estanques y galerías, por lo que con la protección de uno de estos elementos se incluye una muestra de casi toda la ingeniería hidráulica de las islas.

Un ejemplo a seguir, en materia de defensa del patrimonio hidráulico, es la isla de Gran Canaria. Esta isla conserva catalogados oficialmente un total de 4.511 bienes patrimoniales, lo que supone casi el 50% de total de elementos etnográficos, aunque aún quedan elementos por incluir, aún así estamos ante una de las regiones del planeta con más densidad en arquitectura e ingeniería del agua del mundo y principalmente por grandes presas y estanques. Con toda seguridad estos parámetros se repetirán en cada una de las demás islas cuando inicien o completen en caso sus cartas etnográficas.

El patrimonio hidráulico conviene ponerlo en activo; inicialmente sería necesario realizar un inventario para dar a conocer estas obras, su ubicación e historia en sus respectivos municipios, ya que en la actualidad muchas de ellas no se conocen ni se aprecian.

Este patrimonio hidráulico no es un legado puramente histórico, sino también cultural y económico de primer orden, además esta propuesta puede ser bien acogida porque en los actuales tiempos de crisis económica supone muy pocos gastos.

Otro objetivo primordial sería conseguir que la mayoría de las obras se consideren patrimonio histórico, y que cada ayuntamiento disponga de un instrumento útil para poder valorarlas y catalogarlas, y evitar su derribo y abandono aleatorio. De igual modo, los ayuntamientos y cabildos de las diferentes islas podrían incluir, a partir de ese inventario y catalogación patrimonial, en los planos municipales las obras hidráulicas de que dispone cada municipio e incorporarlas a su oferta turística y cultural, algo muy interesante en una región como Canarias, con una industria turística importante. Para difundir este legado de la cultura del agua y que llegue a todos los ciudadanos sería muy interesante crear un portal sobre Patrimonio Hidráulico Canario, en internet, que en algunas islas ya está en marcha.

2. Obras hidráulicas de almacenamiento y regulación antiguas

La necesidad de regular y almacenar el agua en las zonas donde más escaseaba hizo necesaria, desde los tiempos prehistóricos y protohistóricos de la sociedad indígena canaria hasta la actualidad, la construcción de obras de almacenamiento que, a lo largo del tiempo y en función de las especificidades de cada comarca y cada isla, fueron evolucionando.

El principio de los tiempos la sociedad indígena emplea pequeñas albercas embutidas en el terreno y reforzadas con muros de piedra y barro, además de pocetas y cazoletas excavadas en los riscos; luego, los colonizadores europeos mejoran la infraestructura aprovechando incluso obras hidráulicas preexistentes con los nuevos materiales y tecnología construyendo pequeños estanques, pozas y albercones y más tarde, a partir de finales del siglo XIX hasta mediados del XX, se construyen grandes estanques, albercones, maretas, balsas y presas.

A veces resulta complicado establecer un mismo criterio de denominación de estas obras hidráulicas de almacenamiento del agua para toda Canarias puesto que cada isla ha generado su propia nomenclatura; pero, tenga un nombre u otro, lo cierto es que es tal la cantidad de estas obras, la antigüedad de muchas y la diversidad de modelos constructivos que

estamos ante un conjunto patrimonial histórico de gran valor, que solo podemos esbozar en su generalidad y atendiendo a criterios cronológicos en los siguientes apartados.

Muchas son las referencias, tanto en las fuentes etnohistóricas como en los descubrimientos arqueológicos sobre las primeras obras hidráulicas de almacenamiento y regulación de las aguas pluviales y manantes. Así por ejemplo, en el yacimiento arqueológico del Barranquillo de Los Negros en San Bartolomé de Tirajana existen los restos de una pequeña maretá para almacenar las aguas pluviales de una casa canaria allí existente, las antiguas maretas con su red de cogida del agua de la lluvia debieron haberse ampliado sobre obras hidráulicas preexistentes de los aborígenes, caso de la Gran Maretá de Tegui (González M, 2006). Se trataba de cisternas naturales excavadas o acondicionadas en hondonadas del terreno con algunas paredes de piedra y barro para contener el agua almacenada. Estos elementos tangibles del Patrimonio Hidráulico Indígena precursor de las grandes balsas de barro se complementan con otros de pocetas, cisternas y aljibes excavadas en roca así con estrategias de hidrocultivos como nateros, gavias, berrazas... sin olvidar los pozos-aljibes construidos antes por los púnicos y romanos antes de la llegada y establecimiento de las distintas oleadas migratorias los colonizadores del área bereber origen luego de la sociedad isleña.

2.1. Tanques, albercas y albercones antiguos

Son las obras de fábrica para almacenamiento de aguas más antiguas, que según zonas e islas tienen denominaciones distintas aunque se levantan con la misma técnica constructiva. El tanque conlleva una planta cuadrangular u oval, mientras que la alberca y el albercón la tienen de forma circular. Tanto unos como otros llevan muros tanto de mampostería ordinaria (piedra, argamasa de cal, arena o picón volcánico) aunque también se hicieron con piedra y barro y con un revestimiento interior impermeabilizante de argamasa de cal y arena. Casi todos los estanques estaban embutidos en el terreno para ahorrarse la costosa obra de fábrica en sus muros.

Se le denominaba albercas, en Gran Canaria, a pequeños estanques de planta circular, con una capacidad de unos 10 m³ por lo general embutidos casi toda su obra en el terreno y con muros de contención de mampostería ordinaria (también se construyeron de cantos de materiales volcánicos); frente a otras obras de la misma planta pero de mayores dimensiones conocidos como albercones cuyos muros de contención eran más altos y gruesos reforzados con contrafuertes, que podían almacenar mayor cantidad de agua; algunos de los cuales aún están en pie como el histórico *Albercón de la Virgen* (Guía de Gran Canaria) de mediados del siglo XVIII.



Figura 20.1; Alberca en el Valle de Tahodio, en Tenerife. (Santamarta JC, 2011)



Figura 20.2; Mareta con abrevadero para bestias en Lanzarote. (Santamarta JC, 2011)

Estas primeras obras hidráulicas de almacenamiento casi siempre llevaban anexo un conjunto de lavaderos y abrevadero para el ganado. Y en su interior para faenas de limpieza de los limos y azolves llevaban una sencilla escalera de piedras a modo de lajas incrustadas en su muro.

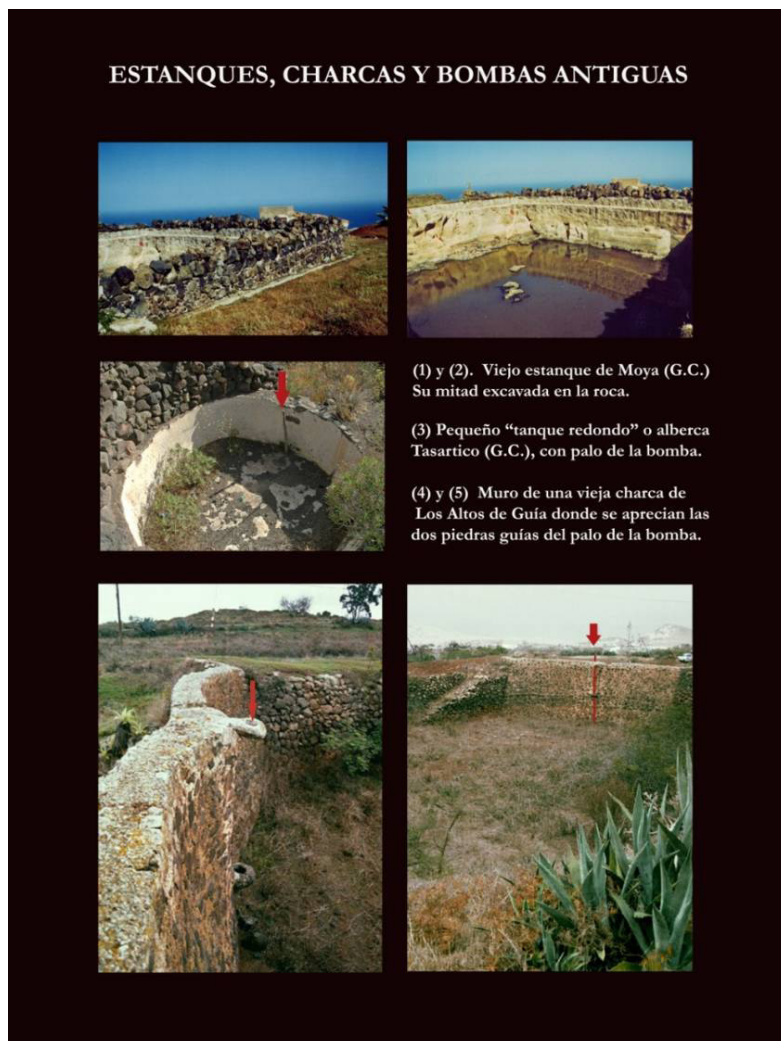


Figura 20.3; Tres modelos de estanques y charcas antiguas con su sistema de evacuación del agua (bomba) señalado con rojo y flecha. (Amanhuy Suárez)

Sencillo y singular era su sistema de salida del agua. En su base interior, junto a la base del muro, se hallaba el orificio de evacuación del agua al exterior, denominado *bomba del tanque*. En su conjunto consistía en estrategia muy simple: un orificio vertical en el fondo del estanque, excavado en una piedra, conectaba a modo de codo con un tubo horizontal que salía por debajo hacia el exterior. Para trancar la bomba bastaba simplemente con meter en el agujero un palo largo, a presión, que llevaba en su punta un trapo de arpillera a modo de empaquetadura

2.2. Mareas de las islas orientales

Estas son estructuras hidráulicas de captación de recursos hídricos superficiales, típicos de la isla de Fuerteventura y Lanzarote. En un principio, el fundamento de esta obra de ingeniería hidráulica era básicamente como una pequeña presa de materiales sueltos, transversal al barranco, cuando por las lluvias, los barrancos transportaban agua, -en muy escasas ocasiones en el caso de Fuerteventura- las mareas; se comportaban como aljibes que disponían de un azud de derivación que recogía el agua procedente de la escorrentía; mediante un canal se transportaba el agua hacia un aljibe que la almacenaba. La superficie de recogida de aguas de la marea es la estudiada *alcogida*.

Una característica fundamental de esta superficie es que debe estar compuesta de materiales arcillosos que garantizan cierta impermeabilidad. También incluyen un sistema de drenaje, tipo *espina de pez*, para conducir el agua hacia su depósito. Estas *mareas* deben tener un mantenimiento importante ya que si no se van aterrando (mediante arenas y arcillas), perdiendo así su capacidad hidráulica, aunque en un principio estas mareas se construían con piedra posteriormente en los siglos XIX se comenzaron a construir mediante cal hidráulica y cemento a semejanza de los estudiados estanques del resto de las Islas.

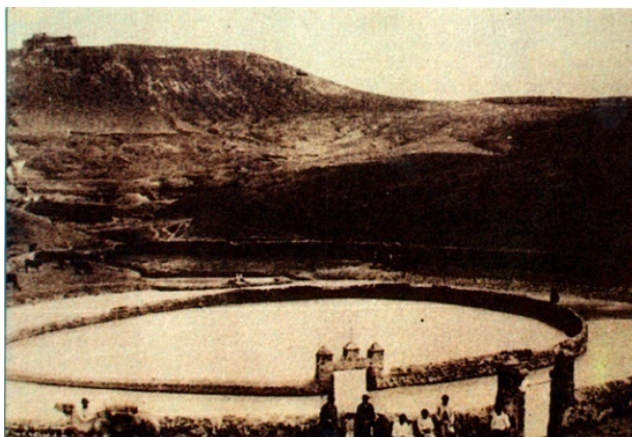


Figura 20.4; Marea antigua de Lanzarote. (FEDAC)

Pero de todas las maretas de las islas orientales, es la *Gran Mareta de Teguisse* la más famosa, que estuvo funcionando más de 500 años. Al parecer se construyó sobre una antigua charca aborigen (*eres*). Tenía más de 9 metros de profundidad y 80 metros diámetro, lo que podía embalsar hasta 80.000 pipas (40.000 m³) (González M., 2006).



Figura 20.5; Localizaciones de maretas y pozos antiguos en Lanzarote (Amanhuy Suárez).

2.3. Tanques-cueva

En Tenerife, La Palma, El Hierro y Gran Canaria se empezaron a construir desde tiempo inmemorial pequeños aljibes-cueva y medianos tanques cueva, en huecos del terreno montañoso asociado a almagres u otros materiales volcánicos susceptibles tanto para generar minamientos de agua por su comportamiento impermeable con los de acuíferos colgados como para ser de fácil excavación. Esta singular estrategia hidráulica adquiere una gran dimensión por las medianías y cumbres de barlovento de Gran Canaria con gran densidad y con la sobresaliente capacidad de almacenamiento de algunos, superior a los 100 m³. La gran ventaja de estos estanques, frente a los convencionales, está en que al excavar en roca no usa terreno agrícola frente a la escasez del mismo, la poca obra de fábrica que requiere (solo un

muro de contención a la entrada de la cueva que, en algunos casos, no llega ni al metro de longitud) y al estar cubierto no genera en sus aguas evapotranspiración tanto del solo como del viento.

En Gran Canaria hay unos 300 estanques cueva catalogados en las cartas etnográficas municipales; casi todos son sencillos con un solo hueco pero algunos están complementados con obra a cielo abierto ya que estos proceden de excavaciones previas de canteras, otros presentan volúmenes de encanto, sobre todo cuando están perforados en toba volcánica de cromatismos diferentes (ocres, rojos, violáceos, grises...) que contrastan con las aguas y sus elementos bióticos como culantrillos, hierbas, berrazas...y algunos conllevan en su interior columnas, techos abovedados y comunicaciones entre cuevas diferentes (Suárez M y Suárez P , 2005).



Figura 20.6; Singular estanque cueva, excavado en material volcánico, de las medianías húmedas de Gran Canaria, conformado por varios departamentos interiores, techo abovedado y columnas interiores. (Suarez, F)

2.4. Tanques de madera

Mención especial requieren los tanques de madera las islas de El Hierro y La Palma, de lo que dio cuenta Torriani (1978) en el siglo XVI y luego para La Palma son constantes las referencias documentales en protocolos notariales del siglos XVI y continúa en el XVII y XVIII, localizados casi siempre en parajes donde no habían casi cursos de agua y había que acumular reservas.

Los textos antiguos se hacen referencia incluso a las diferentes partes de los mismos tales como gatos, durmiente, testero, plan de cobija, etc. puesto que se construían con tablones de madera de pinos viejos con abundante tea por su dureza e impermeabilidad. Las juntas de los tablones y todo el interior se impermeabilizaba con el betún extraído de los pinares, la *pez o brea*. Estamos ante unos pequeños receptáculos de planta cuadrangular que en principio, hacia el siglo XVI, podría alcanzar los ocho metros de largo por cinco seis de ancho y unos dos y medio de altura, un volumen de 100 m³ frente a los que recuerda la tradición oral, ya mas reciente (caso de Las Tricias en Guadarfía) que eran de base cuadrada de unos tres metros de lado por un metro de altura cuyo volumen se reduce a los 9 m³. En ellos se almacenaban aguas manantes y pluviales a través de pequeñas canales de madera.

Los tanques de madera fueron muy comunes en el paisaje insular sobre todo en el cuadrante noroeste por los municipios de Tijarafe, Punta Gorda y Garafía, siendo en estos en dos últimos, zona del Camino de Matos (Punta Gorda) y Las Tricias (Garafía) las últimas referencias de su existencia en esta isla, concretamente la tradición oral reciente recuerda la existencia de dos grandes maderos de tea de más de cinco metros de largo con dos agujeros en sus extremos de un tanque que hace más de 40 años se hallaba en el barranco de El Roque (Punta Gorda) (País *et al.* 2007).

A finales del siglo XIX comenzó a escasear la pez o brea y la madera de tea, a la vez que el deterioro de los tanques antiguos fue más acusado frente a la generalización los aljibes de obra de fábrica tanto con argamasa de cal como del cemento portland de importación por el puerto franco y estos curiosos estanques de madera comenzaron a desaparecer hasta su extinción a mitad del siglo XX.

2.5. Charcas, pozas y pocetas

Aparecen en todas las islas y debieron ser conocidas en algunas islas por la sociedad aborígen. Se definen como un pequeño recipiente de agua de unos 10 a 36 metros cúbicos de planta redonda u oval, encajados en el terreno arcilloso con poca o casi ninguna obra de fábrica para la contención de las aguas, y en caso de alguna obra esta sería un muro de contención y un sistema simple de bomba de salida. Esta técnica milenaria, originaria de las regiones áridas del cercano Oriente, a finales del siglo XIX derivaría en Canarias en la construcción recipientes mayores, los llamados tanques de barro y que son la base de las modernas balsas.

También se construyó en terreno rocoso de lagunas islas, sobre todo el de mantos de toba volcánica fácil de excavar unas pequeñas pozas o pocetas, casi siempre de planta circular. Acumulaban tanto aguas pluviales como manantes para uso doméstico o pecuario. En algunos casos cuando estas pocetas en terreno rocoso alcanzaban unas dimensiones significativas, superior a los dos metros de diámetro podían tener la denominación de *charca*.



Figura 20.7; Poza en el Hierro. (Santamarta JC, 2009)

2.6. Aljibes y acogidas del agua (*alcogidas*)

Estamos ante una de las estrategias hidráulicas de almacenamiento del agua de lluvia más interesante de Canarias por la variedad de arquitecturas existente, por la densidad de unidades en determinadas comarcas de clima xérico y por la importancia que tuvo para la supervivencia de esta zona.

Los aljibes canarios se encuentran principalmente en las islas de Lanzarote y Fuerteventura así como a sotavento de El Hierro, Gran Canaria, Tenerife y La Palma. Se generalizó sobre todo para uso doméstico siguiendo una ancestral técnica hidráulica conocida desde la Antigüedad y el Mundo Clásico y difundida por el Norte de África y la Península Ibérica por la cultura árabe con la denominación de *aljibe* (del árabe hispano *algúbb*, y este del árabe clásico *gubb*).



Figura 20.8; Poza en el Hierro. (Santamarta JC, 2010)

Son unos depósitos subterráneos que permiten almacenar las aguas de lluvia, recogidas a través de canalizaciones y escorrentías controladas. Toda la sabiduría popular se acumulaba a la hora de construir el *aljibe* de la casa y poder acumular el agua potable necesaria para la familia y otros usos con una serie de detalles constructivos externos tales como la zona de captación, las conducciones y las pocetas de decantación. Hasta hace relativamente poco tiempo en las islas Canarias, hacer una casa sin *aljibe* en el campo era poco menos que imposible. Era la única forma de garantizar el suministro de agua. Era incluso usual, como en la isla de Lanzarote que fuera más valioso el *aljibe* o depósito de aguas que la propia casa.

Mucho tenemos que profundizar en el tiempo histórico canario para localizar los aljibes más antiguos. Y así es los ya mencionados pozos-aljibe excavados en la zona sur de Lanzarote, son las obras hidráulicas más antiguas de Canarias. En uno de ellos se aprecia un dintel con el símbolo de la diosa púnica Tanis y en otro su estructura responde al típico modelo de pozo romano, lo que, junto a los demás materiales arqueológicos encontrados en el entorno de estas obras hidráulicas, datadas entre los siglos I al III de nuestra era, ha originado una nueva reinterpretación sobre el origen de los mismos (Atoche *et al.*, 1999), pues hasta hace poco eran considerados como obras hidráulicas de los conquistadores normandos del siglo XV. Estas interpretaciones arqueológicas parecen indicar que son obras de almacenamiento de las aguas

pluviales de navegantes cartagineses y romanos que venían a Canarias en búsqueda de materias primas colorantes aunque no exentas de controversias.

Los aljibes que conocemos en todas las islas, aún en uso muchas de ellas, como otro bien patrimonial hidráulico, presentan modelos diferentes dentro del diseño común de que es una obra completamente cerrada, casi siempre con abovedado o plano, con planta circular, cuadrada o rectangular, en cuyo techo donde se abre una hueco por donde se extrae el agua con una soga y cubo, siendo casi siempre surtida por aguas pluviales y en algunos casos manantes. Algunas aljibes cubiertas y de planta circular en las islas orientales suelen denominarse como *cisternas*.

El mantenimiento de un aljibe en las zonas secas era un objetivo fundamental de la tarea doméstica por el mes de septiembre antes de las primeras lluvias: limpieza de los sedimentos del aljibe y de las azoteas, alcogidas, conducciones y coladores o decantadores. Como es un recipiente sin luz no generan larvas ni limos pero tradicionalmente se trataba su desinfección con una piedra de cal.



Figura 20.9; Museo Vivo de La Alcogida donde encontramos una interesante red de aljibes cubiertos- pozos descubiertos- decantadores de captación y almacenamiento del agua de lluvia. (Suárez F., 2011)

Relacionado con el aljibe se hallaba toda amplia estrategia y consiguientes obras hidráulicas para captar, conducir y colar el agua antes de almacenarla en el mismo. Destacamos en Lanzarote y Fuerteventura los amplios espacios, a campo abierto, impermeabilizados para ello denominados *acogidas* o *alcogidas* donde se capta las aguas pluviales, conducidas luego por canalizaciones con desnivel adecuado en dirección a las mismas; constituyen unas sencillas obras hidráulicas de impermeabilización del terreno con una capa de argamasa de cal, en terrenos enladerados susceptibles de captar y desviar por gravedad el agua hasta los aljibes. Algunas cubren espaciosas laderas de montaña como las *alcogidas* de La Corona, Tiagua, La Geria... en Lanzarote (González M, 2006). Algunas han dado nombre a zonas como La Alcogida en Tefía (Fuerteventura) donde se ha creado un interesante ecomuseo etnográfico, donde entre otros bienes se expone la red hidráulica de captación y almacenamiento de las aguas pluviales a través de caños, áreas empedradas, coladeras, aljibes cubiertos y pozos-aljibe-decantadores-coladeros a cielo abierto. Por un aljibe aparte de la obra en sí y de la zona de acogida necesitaba una red de canalizaciones adecuadas y puntos, sobre todo a la entrada del mismo, de decantación de los azolves de las aguas, denominados los coladeros, que son simples cavidades donde las aguas se asientan.

La tipología arquitectónica, capacidad, sistema de recepción y naturaleza de las aguas a almacenar son extraordinariamente diversas según islas y zonas de cada una de las mismas. Así en las zonas húmedas encontramos aljibes de poca capacidad para almacenar aguas manantes y en las secas de mayor capacidad, algunas verdaderos estanques subterráneos para aguas pluviales. De ello tenemos un importante referencial bibliográfico. En Lanzarote algunos aljibes de grandes dimensiones suelen denominarse como maretas caso el conjunto de 16 aljibes construidas en Arrecife (1913-1930) conocido como La Mareta del Estado. En esta isla encontramos una gran variedad de aljibes tanto de propiedad privada como pública algunas de extraordinario valor etnográfico y arquitectónico como la de Rubicón (San Bartolomé) de techo abovedado y un revestimiento interior con mortero de cal al que se adhiere una pantalla de conchas marinas (lapas y burgados junto a trozos de cerámica para fortalecer dicho recubrimiento (Perera B, 2000) y otros muchos ejemplos más de aljibes antiguas singulares tanto por su modelo arquitectónico (pilastras interiores que sostienen techos abovedados con cantos en arcos rebajados con dovelas de cantería a veces encajadas sin morteros, etc.) como por la variedad de elementos asociados como red de captaciones (*alcogidas*), conducciones, decantación de sólidos, piletas o tornajos, lavaderos anexos (Perera B y Hernández G, 2006).

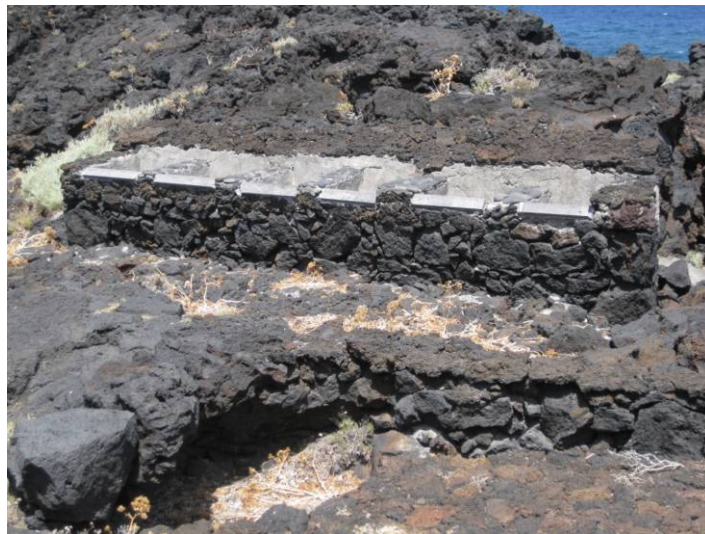


Figura 20.10; Lavadero asociado a un aljibe en zona volcánica reciente de El Hierro. (Santamarta JC, 2010)

En Gran Canaria destacan los aljibes de Ingenio con techo cúpula que también encontramos en el Sur de Tenerife (Sánchez V, 2011) (Hernández M, 2011); así como una extraordinaria variedad de unidades por las demás islas hasta La Palma que encontramos a la superficie de acogida del agua de lluvia que recibe el nombre de tinglado o el techo de la obra cubierto por un fuerte armazón de madera de vigas y tablones tea denominado *suallado* (Pais *et al.* 2007).

En la actualidad está comenzando a verse un auge de los *aljibes*, de hecho a nivel europeo, es patente el caso de la isla de Chipre donde están ampliamente subvencionados. En Canarias, la recuperación de esta obra hidráulica está asociada al agua de abastecimiento público donde los ayuntamientos cuentan con decenas de ellas, en obra de hormigón armado con planta cuadrangular o redonda y de gran capacidad de almacenamiento, superior a las 100 m³, verdaderos estanques cubiertos pero que reciben esta denominación de *aljibe*.



Figura 20.11; Alcogida y aljibe en Lanzarote (Santamarta JC, 2010)

3. Nuevas obras hidráulicas (siglos XIX y XX)

Llegó un momento en que las Islas necesitaron mucha agua y hubo que buscarla por todos lados y almacenarla para luego distribuirla entre los cultivos agrícolas. Primero fueron los de caña dulce (1880-1918) para las fábricas de azúcar en Gran Canaria, Tenerife y La Palma y luego los de papas, tomates y plátanos para la exportación al mercado europeo entre finales del siglo XIX y mediados del XX. Las aguas superficiales se condujeron a grandes obras de almacenamiento al igual que las subterráneas captadas ahora a través de la estrategia minera de pozos y galerías y a vez elevadas por medios mecánicos hacia tomaderos y estanques de regulación a través de una complicada red de canales y tuberías. Las estrategias constructivas solo variaron en la dimensión de las obras en un principio con los materiales tradicionales de la mampostería ordinaria y luego con cemento portland para hormigonados con armaduras de hierro. Podemos establecer las siguientes categorías de obras hidráulicas modernas: estanques, maretas, charcas y presas.

3.1. Grandes estanques y maretas

Se empezaron a construir a partir de 1880, a fin de almacenar agua de cualquier origen. Tienen en común el tener sus muros de contención de obra en mampostería ordinaria primero (arena, picón volcánicos, cal/cemento y piedras) y luego el añadido de un nuevo aglomerante: el cemento portland de importación; aunque por el norte de Gran Canaria aparecen antes unos estanques medianos de muros estrechos pero reforzados a tramos por contrafuertes o estribos algunos de sillares de cantería. La mayor densidad de Canarias de maretas la encontramos en el conjunto hidráulico de Trujillo-Moreto (Moya), para el riego de las plataneras de la Costa Norte (Suárez M y Suárez P, 2005).

En cada isla y en zonas diferentes de las mismas tienen denominaciones diferentes. Así una obra de planta cuadrangular con capacidad variable de hasta unas 300 m³ aproximadamente, se asocia a la denominación simple de *estanque* y otros, capaces de acumular mayor cantidad, hasta 18.000 m³, se denominan *maretas* aunque encontramos en algunos lugares, donde los estanques son pequeños que denominan *mareta* a un estanque con una capacidad menor a los 100 m³, como lo hacen en Lanzarote o en el oeste de Gran Canaria. Estas voluminosas obras requerían gran espacio puesto que sus muros de contención, algunos de 5 a 15 metros de altura o más debían llevar una sección de base ancha para soportar la presión del agua, que se establecía para mayor seguridad en muro de gravedad en la proporción de 1:0,7 y un talud externo del 0,7, aunque estos parámetros variaban si la obra iba o no embutida en el terreno. En unos casos encontramos el paramento interior completamente vertical y en otros escalonado para aprovechar mejor el terreno donde tenía más valor.

3.2. Estanques y maretas redondas de cemento

En el norte de las islas de Gran Canaria, Tenerife y determinadas zonas de La Palma, encontramos que, a principios del siglo XX, en el marco del puerto franco que permitía la importación de cemento portland relativamente barato, la construcción generalizada de grandes estanques de planta circular de hormigón armado con armadura de hierro.

Estas obras tienen la denominación de estanques o de maretas redondas en función de su capacidad. La obra se realiza al principio con una fuerte armadura de hierro

desde su base hasta el muro de cerramiento, con unos contrafuertes verticales y horizontales que cercan el conjunto. Todos ellos asociados a empresarios agrícolas de platanera y a terrenos llanos donde no se puede realizar obras embutidas en laderas y donde dicho terreno tiene un mayor valor frente al ahorro de espacio que estas obras conllevan.

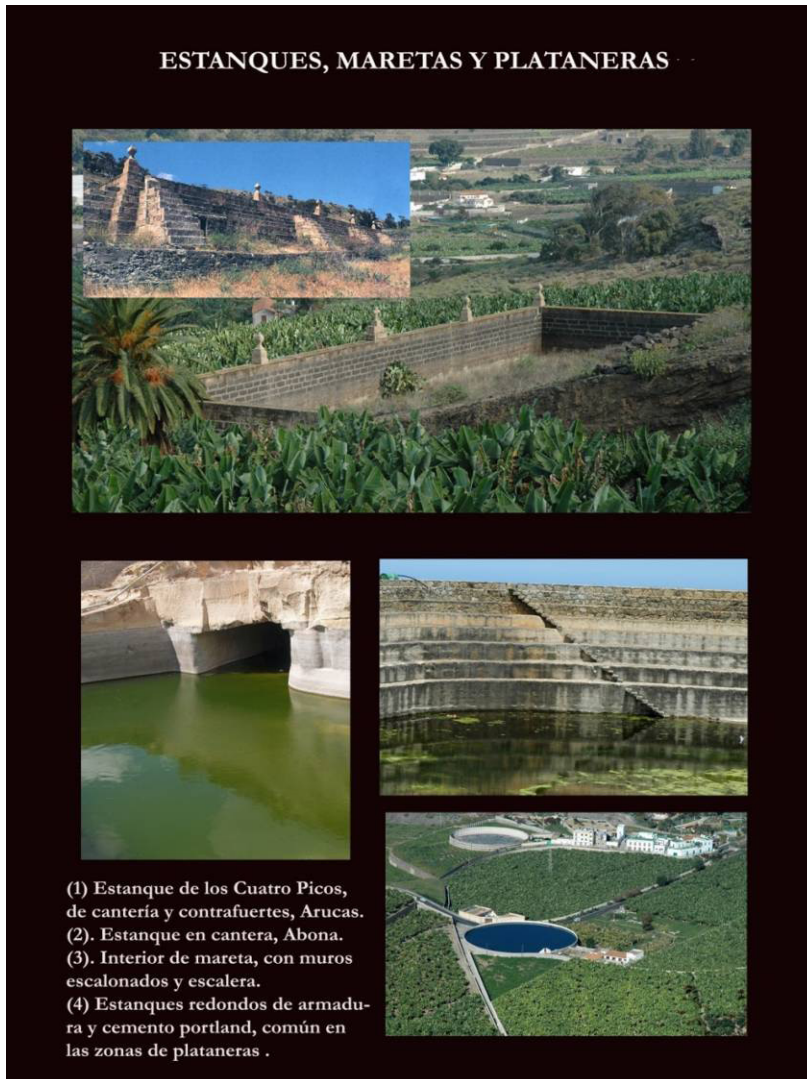


Figura 20.12; Tipologías de estanques (Suarez Amanhuy, 2010)

3.3. Estanques y maretas de canteras

El aprovechamiento de las canteras para almacenar en sus huecos agua para uso agrario y de abastecimiento a la población tiene lugar cuando estas explotaciones mineras para la construcción alcanzan una gran actividad según crece la población entre finales del siglo XIX y principios del XX. Las canteras reutilizadas como estanques son las excavadas en mantos de depósitos de nube ardiente y tobas traquíticas que abundan por el sur de Tenerife y el norte de Gran Canaria. Los estanques de las canteras de San Miguel de Abona y otras zonas sureñas apenas necesitan revestimiento interior por la poca permeabilidad de aquella toba; en cambio, los estanques de las canteras de Gáldar, sí requirieron un enfoscado de argamasa de cal con mezcla de cemento, ya que presenta una textura granular gruesa algo permeable. Pero fueron tantas las explotaciones en esta zona, para el célebre producto del “canto dorado de Gáldar”, empleado también en las obras hidráulicas y la necesidad de acumular tanta agua en la comarca para los cultivos de plataneras que se encontraron con estos huecos de grandes dimensiones para conformar no estanques sino grandes maretas embutidas en el terreno de las faldas del Volcán de Gáldar. «Estos grandes estanques producen extraordinarias perspectivas de sombras, colores y volúmenes que exaltan los vacíos o los llenos acompañados, a veces, del espectáculo de los chorros de agua que caen en ellos, lo que unido a los artísticos volúmenes, de sus escalinata, las cantoneras de distribución y canales adyacentes coadyuva a magnificar esa dialéctica de las comunidades humanas con la Naturaleza» (Suárez M y Suárez P, 2005).



Figura 20.12; Impresionante maretta conocida como la de los Aguilares, en el hueco de una cantera de las faldas del volcán de Gáldar, Gran Canaria (Amanhuy Suárez, 2005)

3.4. Nuevas charcas, masapés y balsas

Grandes charcas o estanques de barro, singulares obras que responden a la antiquísima técnica de las antiguas charcas del Mundo Antiguo en Mesopotamia, sin otro material y técnica que el barro transportado prensado a fuerza de sangre (obreros y bueyes) y, por ende, son la continuación de las técnicas constructivas de la ingeniería popular que se enraíza en las primeras charcas de la sociedad indígena. Pero las modernas charcas, surgidas desde finales del siglo XIX hasta las actuales, denominadas balsas (con fondo impermeable de plástico y modernos geosintéticos) de una capacidad extraordinaria similar a la de cualquier presa y no es otra cosa que la acumulación de la experiencia en esa dialéctica constante del canario con su Naturaleza, por ejemplo las balsas de Acanabre (La Gomera), de 45.000 m³, o la de Echedo (El Hierro), de 44.000 m³. En la isla de El Hierro estas grandes balsas, en desniveles distintos, se va aprovechar dentro de un programa energético sostenible.

Por lo general son obras embutidas en vaguadas, en las que se dibuja una planta oval o cuadrangular e incluso algunas están dentro de algún cono volcánico por el norte de Tenerife, isla en la que en otro tiempo empleó esta estrategia hidráulica de lo que solo quedan las charcas de Cantarranas-Tejina (Hernández H, 2011).



Figura 20.14; Conjunto de masapés secos de Santidad (Arucas). (Suárez M, 2005)

Pero el paradigma histórico de las charcas, por su densidad e importancia económica está en el norte de Gran Canaria, entre Tamaraceite, Tenoya y San Lorenzo. Las cartas etnográficas de toda la isla solo suman un centenar pero solo en el municipio de Arucas la base cartográfica de GRAFCAN arroja un total de 116. Aquí estas charcas son denominadas como *masapés*, nombre que se daba al barro con que se construía, unas arcillas producidas por la descomposición de los materiales volcánicos fonolíticos poco fértiles para los cultivos agrícolas. La mayor densidad de estos se encuentra en la ladera de Riquiáñez donde están casi encadenados unos con otros, desde Visvique a Santigas, más de 20 unidades (Jiménez M *et al.*, 2008). Son embalses embutidos en el terreno de planta oval o cuadrangular con esquinas curvas de amplios muros de contención de arcillas/sedimentos de naturaleza fonolítica muy impermeables con algún refuerzo de muros de piedra sobre todo en el fondo donde se construye la bomba de evacuación, capaces de almacenar de 720 a 3.600 m³. Se levantaban con arcillas húmedas muy apisonadas por centenares de obreros y bestias de carga, con lo que el material quedaba muy cohesionado (Benítez P, 1959).



Figura 20.15; Balsa de Taco (Buenavista del Norte, Tenerife), en el mismo cráter de un cono volcánico (Hernández Martín, 2009).

3.5. Presas

Así se le denomina en Canarias a los embalses, que constituyen otro importante ja-lón en la historia hidráulica insular. Las primeras presas que se levantan en Canarias, a principios del siglo XX son obras de capacidad inferior a los 0'5 Hm³. llevadas a cabo

con capital privado. La primera obra de altura superior a 15 metros que se levanta en las Islas es la presa de Pinto, en Arucas, una obra terminada en 1906, cuya capacidad alcanza los 0'494 Hm³, le siguen otras construcciones hasta que a mediados del siglo se ejecutan las grandes presas insulares, con capacidades comprendidas entre 1 y 5 Hm³, bajo la acción tutelar del Estado.

Las primeras presas se levantaron con la estructura de arco, en mampostería hidráulica con paramentos de sillería natural o artificial en su caso y representan un ejemplo de la ingeniería académica en este tipo de obra (mampostería y canteoría) con materiales del entorno. Luego, después de 1950, comenzó a construirse las grandes presas de hormigón y de materiales sin trabar, sobre todo en los barrancos del este y sur de las islas en escudo de materiales impermeables (Gran Canaria y La Gomera).

Destacan las grandes presas de hormigón de Gran Canaria, como la de Soria (40 hm³) (González G. 2010). Esta isla tiene un centenar de presas de las que 62 tienen más de 15 metros de altura (el 84% de la capacidad total de embalse de Canarias, unos 100 Hm³ anual). Algunas, por su historia y elementos constructivos, están recogidas en los catálogos de bienes patrimoniales. Es el caso de las presas antiguas del Barranco de Santo y de Tahodio, la Charca de Ascanio en Tenerife o las presas de Pinto, La Marquesa, etc. en Gran Canaria (ver en este libro el artículo sobre las presas en Canarias de Jaime González).

La presa de Pinto, Arucas, construida entre 1899 y 1906, es la primera presa de Canarias; una extraordinaria obra de arco, levantada con sillares de piedra noble del lugar, que lleva obras anexas de cantoneras, canalizaciones... que dan por cualquier punto perspectivas admirables de volúmenes paralelepípedos en los cromatismos de la piedra azul.

3.6. Estrategias y obras hidráulicas mineras: pozos, minas y galerías

En los primeros años de la Colonización europea, cuando en determinadas zonas las aguas de los nacientes o las superficiales de los barrancos comenzaron a escasear o bien porque las condiciones climáticas no daban buenos caudales para las necesidades de la población o de la agricultura, se inició un lento proceso de excavaciones en los suelos para encontrar agua de acuerdo con los conocimientos de la tradición hidráulica de las culturas del Mediterráneo Antiguo transmitida por el mundo romano y por la árabe del Al Ándalus, consistente perforaciones de pozos

en búsqueda de las aguas subterráneas o de “minamientos” en la capa de aluviones de los barrancos para captar las aguas subálveas con la técnica de las minas de agua. Cuando entre finales del siglo XIX y principios del XX se necesita más agua para tomateros y plataneras, se construyen más pozos o se profundizan más los preexistentes, lo que terminan por agotar los acuíferos y en primer lugar secar las minas de agua excavadas en los barrancos y, además, se generaliza otra técnica minera, la de las galerías de agua para tanto captar tantos los acuíferos colgados como los subterráneos desde el interior de los pozos. Pozos, minas y galerías en Canarias, por su densidad, diversidad, ingenio, inversión de capitales, desarrollo tecnológico hidráulico formal (académico) e informal (popular) es otro paradigma de la hidráulica histórica y conforma un conjunto de bienes patrimoniales único en el mundo por la densidad de unidades existente.

3.6.1. Pozos

Aparte de los pozos muy antiguos de Lanzarote, para algunos autores de origen púnico-romano, entre finales del siglo XV y principios del XVI, comenzó a generalizarse, en casi todas las islas, la perforación de pozos cerca de las poblaciones principales, siguiendo las milenarias técnicas mineras mediterráneas del Mundo Antiguo y Clásico. Se trataba de cortas profundidades (6 a 12 m), con diámetros de 1 ó 2 metros. Una vez alcanzaba el firme (roca compacta o tosca), se forraba con cabezas y ripios o con adobes a cargo de mamposteros especializados en esta labor. Esta técnica se mantuvo hasta tiempos recientes y los pozos que aún se conservan así constituyen las unidades de mayor valor patrimonial.

Al principio muchos de estos pozos fueron para uso doméstico, bastaba para extraer el agua un simple torno o roldana en su caso; pero, luego se intensificó más la captación de las aguas subterráneas para el mismo uso doméstico, abrevaderos y el riego de huertas para lo que se instalaron las primeras norias, que datan de principios del siglo XVI, con los modelos que por entonces se daban por el sur de la península Ibérica y todo el norte de África: las dos ruedas engranadas de madera y los cangilones de barro o de cobre asidos con sogas. Algunos pozos antiguos los encontramos en las poblaciones, para uso doméstico de las islas occidentales, más ricas en aguas pluviales y manantes y por tanto no necesitadas de estas obras costosas para perforar y luego extraer el agua. Los más están aparecen en las islas orientales, más secas y necesitadas de ellos. Según el inventario del Cabildo de 1560, había en Lanzarote, en ese momento, unos 100 pozos, la mayoría en el municipio de Haría, se trataba como ya indicamos de perforaciones de poca profundidad de escaso caudal y de elevada salinidad (González M, 2009). Desde aquel primero momento,

junto al pozo se construía una pequeña alberca o tanque que llevaba adosado en su muro una o dos piletas para el agua de uso doméstico y el abrevadero. Algunos pozos antiguos fueron muy conocidos como los que se hallaban en los puertos para las aguadas de los buques caso del que abastecía al puerto de La Luz o los de Santa Cruz de Tenerife. Pero el primer pozo importante con un extraordinario artilugio de elevación de aguas que conocemos, en Canarias, fue el construido, a principios de 1850, por el IV Conde de la Vega Grande en su hacienda de Jinámar, que aún subsiste con el nombre de la *Noria de Jinámar*, por tener un primer artilugio de noria para elevar agua, luego sustituido por un malacate acoplado a tres bombas de pistón.

La perforación de pozos se generalizó más en las islas orientales, Lanzarote, Fuerteventura y sobre todo en Gran Canaria a finales del siglo XIX y alcanzó su mayor desarrollo a mediados del siglo XX, en el contexto económico de la expansión de la agricultura de exportación y el puertofranquismo. La necesidad de agua obligó a profundizarlos continuamente y a perforar, dentro de los mismos catas (sondeos horizontales) y galerías, en busca de unas aguas subterráneas cuyo nivel descendía peligrosamente 5 metros por año a mitad del siglo XX.

En las islas orientales, sobre todo en Fuerteventura y aún más en Gran Canaria destacan muchos pozos como ejemplo de obra hidráulica tanto por su profundidad y sistemas de galerías interiores, catas, sistemas de elevación... Así tenemos el *Pozo de la Noria de Jinámar* hoy Museo del Agua, en Telde, el Pozo del Pino en Arucas y otros. También las islas occidentales destacan algunos pozos unos históricos como el *Pozo de la Casa de la Aguada* en San Sebastián de La Gomera (Hernández G. y Guerra de P., 2008), el *Pozo de la Salud* en Sabinosa (1702) por sus aguas medicinales (El Hierro) (Teixidor C., 2010) por las propiedades medicinales de sus aguas u otros modernos como el *Pozo de los Padrones*; una obra hidráulica iniciada, junto al acantilado del Valle del Golfo, ampliada a lo largo de la segunda mitad del siglo XX. Primero se perforaron 52 m de profundidad, con un diámetro de 3 m, para continuar en su fondo con una galería, ampliada sucesivamente hasta alcanzar en 1996 un kilómetro profundidad que generó un caudal de 101 L/s. Esta galería se fue cerrando por tramos donde estaban diques, acumulando presión suficiente para elevar parte del agua captada hasta la superficie sin bombeo mecánico. Se constituyó así en el primer y único pozo artesiano de Canarias y el mejor ejemplo de aplicación de tecnología minera hidráulica en este Archipiélago.

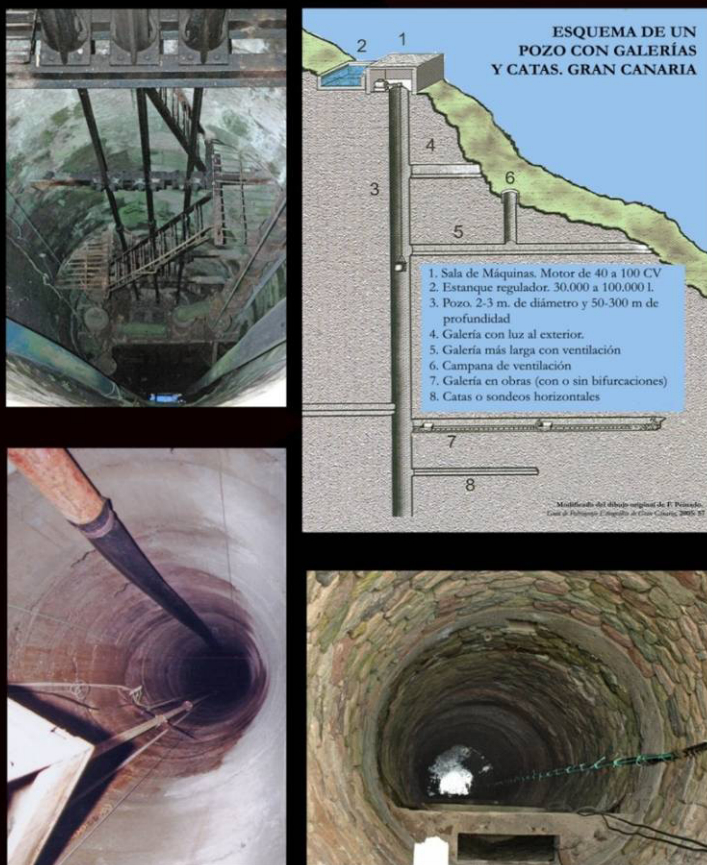
Y es que a partir de principios del siglo XX, alrededor del pozo se generó toda una nueva cultura y tecnología del agua: piqueros, poceros, maquinistas, fundicioneros, etc. fueron elementos nuevos sobre los que se desarrollaron ideas y avances,

aparte las continuas novedades que llegaban, sobre todo del mercado inglés, en equipos de mecánica hidráulica. Asimismo se generalizó, entre finales del siglo XIX y mediados del XX, las antiguas técnicas de indagación para el alumbramiento de aguas ocultas a través de la radiestesia, practicada desde muy antiguo los *zahoríes* del agua. Para ello utilizaban determinadas varillas ahorquilladas extraídas de determinados árboles (en las Canarias Orientales uno de ellos fue el granado, en otros lugares del Mediterráneo el sauce y el avellano). También se empleó en Canarias un sencillo péndulo. La radiestesia, considerada como una actividad pseudocientífica, desarrollada a falta de conocimiento hidrogeológico o de instrumental científico, se basa en el principio de que los estímulos eléctricos, electromagnéticos, magnetismos y radiaciones de un cuerpo emisor pueden ser percibidos por una persona a través de artefactos simples en suspensión inestable tales como péndulos, varillas y horquillas de determinados árboles que son transmisoras de la capacidad de magneto recepción del ser humano. La necesidad de buscar agua en las Canarias Orientales sobre todo en zonas secas y minifundistas, con el auge de los cultivos de tomates y plátanos, donde se generó una gran densidad de pozos, como zonas de Fuerteventura, Telde, La Aldea... sin el conocimiento hidrogeológico actual llevó a la práctica habitual de la radiestesia, donde destacaron algunos personajes que incluso se ilustraron con literatura de vanguardia tales como los trabajos de Víctor Mertens (1950) y Richard Chevalier (1961).

La aventura hacia los acuíferos ocultos a través de pozos y sus galerías complementarias trazadas desde su profundidad representa una extraordinaria y singular actividad minero-hidráulica. Por ejemplo, Gran Canaria es una isla completamente horadada por unos 2.318 pozos que alcanzan una longitud total de 218 km (MAC-21). Algunos tienen profundidades cercanas a los 400 metros, lo que da una idea del enorme esfuerzo de los canarios en la búsqueda del agua subterránea. En todas las islas se contabilizan un total de 4 mil pozos.

En ese episodio se invirtieron grandes caudales de dinero y se cobró el luto de numerosas víctimas mortales por continuados accidentes laborales; uno de ellos propiciado por la naturaleza volcánica con sus emanaciones de gases en algunas zonas, que también afectó a las galerías de Tenerife y La Palma. Para afrontar el peligro se recurrió a la lámpara de carburo; una milenaria tradición pocera que ya el ingeniero y arquitecto romano Marcos Vitrubio reflejó en su célebre tratado de *Los Diez Libros de Arquitectura* (23 al 27 A.C.), que dedica los ocho capítulos del libro VIII a todos los conocimientos de entonces sobre las aguas y sus obras, donde al tratar cómo y dónde perforar un pozo advierte: «bájese allí con un candil encendido, y si no se apaga, se podrá descender sin peligro (...)» (1997:220-221).

LOS POZOS: UN MUNDO BAJO LA TIERRA



- (1). Pozo del Pino (Aruca). 36,5 m x 2,5 m. Forrado con cantería azul. 8 galerías. Sala de máquinas y sistema de bombeo intacto. Extraordinario bien patrimonial.
 (2) Esquema de pozo con galerías diversas.
 (3). Pozo Jacón (Valsequillo). Perforado al fondo de una galería de 1.500 m y con una profundidad de 160 m, desde cuyo fondo parte una profunda galería.
 (4). Pozo más sencillo. Forrado primorosamente con piedras. 28 x 3 m. (La Aldea).

Amanhuy Suárez (2011), sobre dibujo de F. Peinado y foto de F. Suárez

Figura 20.16; Composición sobre los pozos canarios. (Suarez A, 2011).

3.6.2. Minas de agua

En Gran Canaria se generalizó, a partir de principios del siglo XVI y sobre todo después del siglo XVIII, un sistema de búsqueda de las aguas subálveas de los barrancos, a través de unas zanjas que seccionaban los cauces de los barrancos, lo que pudiera tener relación con las *eres* de los aborígenes y que recibió la denominación de *minas*. A principios del siglo XIX se experimentó en zonas de Tenerife aunque no tuvo éxito salvo, probablemente, algunas obras similares trazadas en el barranco de Santos que han desaparecido; no debiendo confundir la denominación de *mina* que hacen en algunos lugares de esta isla a las *galerías* excavadas en la roca, como lo hacen en zonas de Güímar. Bien es verdad que a mediados del siglo XIX cuando comienzan a perforarse las zonas montañosas con galerías en busca de acuíferos colgados esta se denominan en un principio como *minas de agua*.

Las primeras minas de agua estuvieron vinculadas a los antiguos heredamientos o en su caso las posteriores al siglo XVIII crearon sus propias heredades.

Su estrategia de construcción consiste en abrir una zanjas longitudinal o transversalmente al cauce del barranco, reforzadas con muros de piedras, techadas con lajas y recubiertas luego con el material del mismo. Las aguas captadas a lo largo de la mina continúan por efecto de la gravedad, a lo largo de acequia, hacia un pequeño estanque regulador. Las minas pueden tener centenares de metros de longitud, con unas medidas que permitan el paso para su limpieza, que consideramos de unos 0,5 a 0,8 metros de ancho por 0,8 a 1,75 m de profundidad. A lo largo de su recorrido subterráneo disponen, a tramos, de unas aberturas o respiraderos hacia la superficie para facilitar las labores de limpieza dentro de las mismas; son unas lumbreras de ventilación o registros que se denominan *campanas*, debido a que los operarios que trabajaban en las labores de limpieza de las minas solían emplear unas campanillas para comunicarse. Las campanas pueden ser de poca altura o profundas cuando las minas discurren por barrancos de potentes paquetes de cascajos, arenas y sedimentos y requieren escaleras de caracol para bajar a las mismas.

En Gran Canaria se ha podido localizar un conjunto superior a 80 unidades, la mayor parte se encuentran en los barrancos del Sureste y Suroeste. La mina más espectacular es la de la “Heredad de la Acequia Alta de Sardina del Sur y Aldea Blanca” en el barranco de Tirajana. Pero casi todas las minas están hoy obstruidas por tramos y secas desde que a mediados del siglo XX los pozos perforados en los barrancos captaron sus aguas.

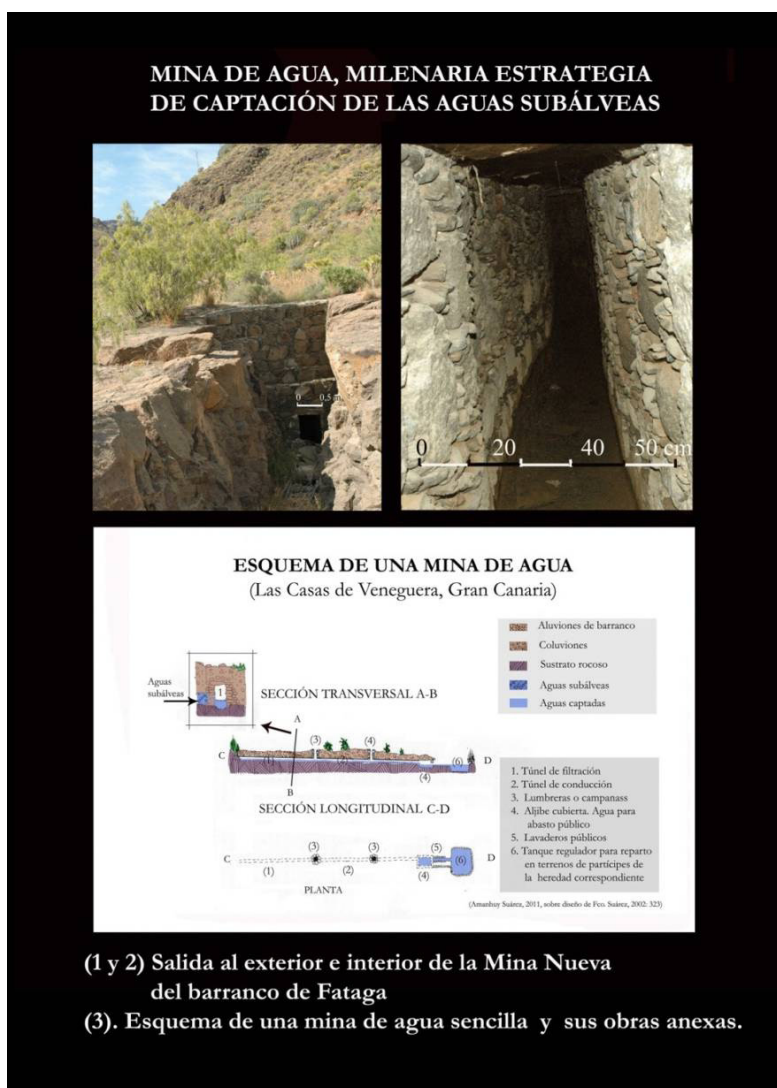


Figura 20.17; Composición sobre las minas canarias. (Suarez A, 2011).

Hoy conforman un valioso bien patrimonial a nivel mundial, dentro de los variados modelos de las galerías filtrantes construidas desde tiempos protohistóricos de las regiones áridas y semiáridas del mundo árabe, pueblos del Mediterráneo y Sudamérica que conllevan una variada terminología: *cimbras*, *alcavons*, *fogaras*, *galerías drenantes*, *galerías de captación*, *viaje de agua*, *minas de agua*, *picos*, *puquios*, etc. (Suárez M, 2002).

3.6.3. Galerías de agua

Las galerías de agua en Canarias son túneles excavados en la roca con la milenaria técnica minera del Cercano Oriente para captar las aguas de los acuíferos colgados, que comienza a desarrollarse a mediados del siglo XIX primero en Gran Canaria y luego en Tenerife y La Palma y que luego se generaliza en estas dos últimas en el marco de la demanda de agua por los cultivos de exportación sobre todo plataneras. Alcanza su mayor densidad e importancia económica, entre 1920 y 1970, sobre todo en la isla de Tenerife, donde se conforma otro paradigma de la historia hidráulica de Canarias, bajo el emblemático volcán del Teide cuyos materiales (coladas, diques, piroclastos, etc.) determinan tanto la formación de bolsas de agua como los diferentes elementos físicos que deben superar las excavaciones incluidos gases y altas temperaturas propias de la naturaleza volcánica.

Esta estrategia de captar el agua subterránea de la base de las montañas con técnicas mineras se inicia parten desde el exterior por una boca u hueco aproximado de 1 a 2 metros de ancho por 2 de alto y alcanzan profundidades de 100 a 3.000 metros, con una ligera inclinación para conseguir que el agua captada salga por gravedad, aunque hay algunos casos con un trazado en rampa descendente en busca de las bolsas de agua y necesitan medios mecánicos (electrobomba) para extraerla.

En Gran Canaria se da otro tipo de galería, como ya estudiamos, las que se trazan desde el interior de los pozos y llevan, en algunos casos lumbreras de ventilación denominadas *campanas* e incluso algunas llegan a asomarse al exterior consiguiendo un desagüe natural del agua captada en su pozo, sin necesidad de elevarla hasta el brocal del pozo.

En Canarias se contabilizan un total aproximado de 1.500 galerías, de las que 63% están en Tenerife, en las zonas medias (400-500 metros sobre el nivel del mar) y en dirección, por regla general, al acuífero de la gran dorsal y base de El Teide; el 23%, en Gran Canaria; 11% en La Palma y el 2% en las restantes islas.

Tenerife ha desarrollado una extraordinaria cultura y oficios relacionado con las galerías (piqueros, barreneros, cabuqueros, maquinistas...). Abiertas a base de dinamita y picos, estas obras hidráulicas necesitaban en la zonas de materiales unos trabajos, denominados “flojeras”, ser reforzadas con arcos de medio punto bien con cantería o anclajes metálicos entrelazados con maderos por lo que han sido obras hidráulicas muy costosas donde, en comunidad, han invertido capitales, pequeños y grandes propietarios. Los mayores alumbramientos de agua en galerías están en

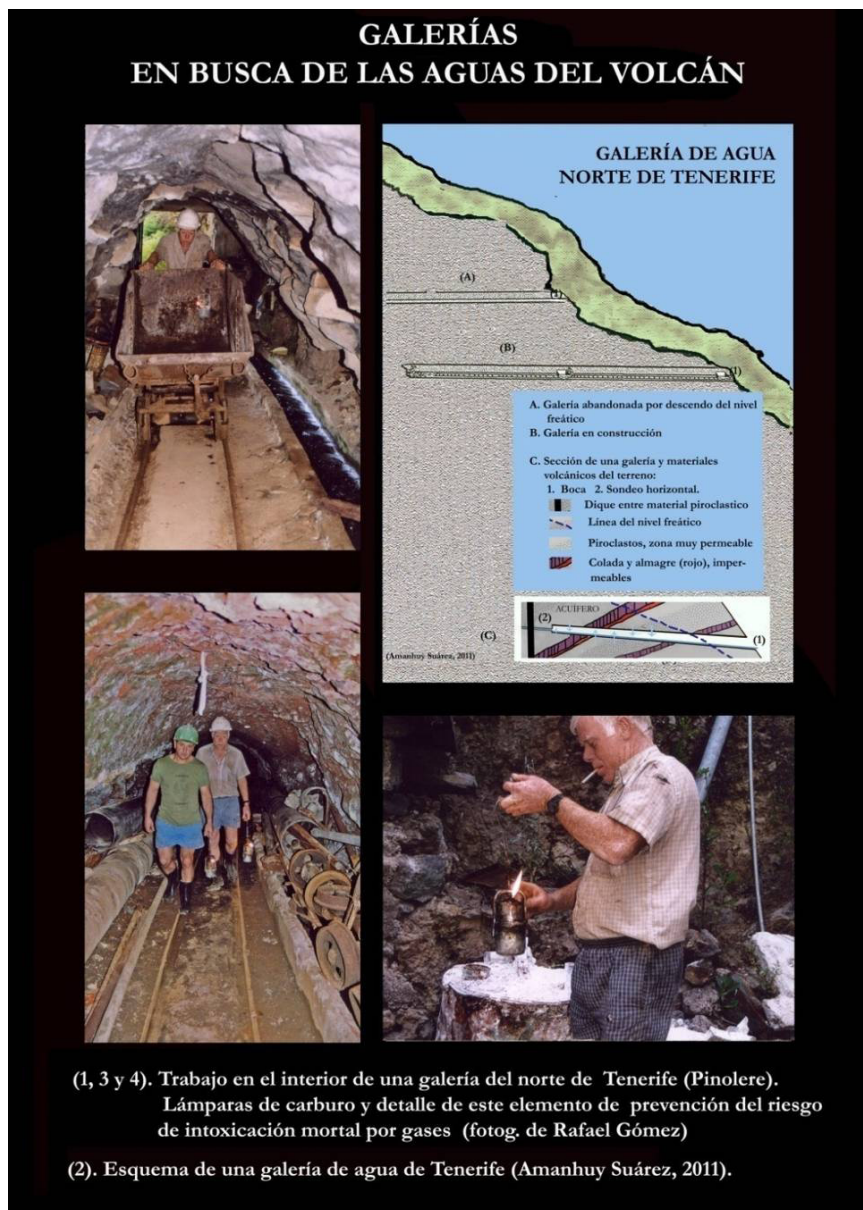


Figura 20.18; Composición sobre las galerías de agua. (Suarez A, 2011). Al igual que en los pozos, la sobreexplotación del acuífero por las galerías, ante la demanda de agua tanto de la agricultura de exportación como del sector turístico y de la población, ha ocasionado un fuerte impacto ambiental que la nueva ley de aguas de Canarias pretende controlar con la tecnología de la desalación de agua de mar para uso urbano.

el Valle de la Orotava, donde se conservan una serie de bienes patrimoniales tangibles o los intangibles de la memoria oral de una época de intenso trabajo minero cargado de accidentes mortales por explosiones, derrumbes y gases tóxicos de la naturaleza volcánica cuyo riesgo laboral se afrontaba con la experiencia, también acumulada en los poceros de Gran Canaria, con una simple prevención: luz de carburo que en contacto con el gas se apaga de inmediato (Gómez L, 2001) (Lorenzo P, 2006).

3.6.4. Artilugios para la extracción y elevación de aguas subterráneas. Las norias

Desde muy antiguo, a principios de la colonización europea, debieron haber importado de Andalucía las norias que los árabes extendieron por la península Ibérica, para la elevación del agua de los pozos. Sencillos artilugios de madera y latón. A mediados del siglo XIX encontramos el pozo hoy conocido como la *Noria de Jinámar*, un extraordinario artilugio de arcaduces en cadena sin fin que luego fue sustituido por otro no menos espectacular de malacate de hierro fundido, movido como la anterior noria por bestias con sus engranajes de desmultiplicación y cabezales para tirar con varillas tres bombas de pistón. Hoy se conserva el edificio y el malacate, obra declarada *Bien de Interés Cultural* y conformado en el mismo un museo del agua representa el primer artilugio mecánico de grandes dimensiones para elevar agua de pozos que se introduce en Canarias (Suárez M. 2001).

Entre finales del siglo XIX y principios del XX, comienzan a importarse las primeras norias de fundición con malacates y a la vez se va generalizando hasta 1936, aeromotores de importación en el área del sureste y oeste de Gran Canaria y Fuerteventura de diversas marcas nacionales, inglesas, alemanas y, sobre todo, las norteamericanas de *Aermotor* y *Samson*. En ello coadyuva la posición de los puertos canarios en la ruta de Ultramar entre tres continentes, beneficiados con las franquicias autorizadas desde 1852, generaron la llegada de tecnología hidráulica de países extranjeros industrializados de uno y otro lado del Atlántico (Fernández G, 1984 y Suárez M, 1994).

La noria es un artilugio, originario del Mundo Antiguo, área geográfica del Oriente Próximo, para elevar agua que los árabes difundieron en la Edad Media por toda la Península Ibérica y que desde allí se trajo a Canarias, después del siglo XV, de ahí que su nombre proceda del árabe naura (نارورة, *nā'ūra*) referido al sonido que la misma produce por rozamiento asociado a un lamento o lloriqueo. A Canarias llegan primero los modelos medievales de madera accionadas por bestias y luego, a finales del siglo XIX, los diseños metálicos de la Segunda Revolución Industrial que

las pequeñas industrias locales copian y rediseñan sus modelos más adecuados a los pozos canarios (Suárez M,1994).



Figura 20.19; Noria de madera rehabilitada. Betancuria (Fuerteventura).

Por tanto, las norias más antiguas eran de madera. Llevaban dos grandes ruedas; una horizontal a modo de linterna y otra vertical con dientes que engranaban en la anterior. Una larga palanca incrustada en la parte superior del eje de la rueda horizontal movía todo el artefacto por el impulso de un asno o un camello que giraba sobre el mismo. En la boca del pozo, la rueda vertical, engranada a la anterior, llevaba directamente enganchada —o a través de otra rueda paralela— una sogas o cadena sin fin enganchados unos arcaduces o vasijas de barro, o bien cangilones de madera o de metal. Estas son las norias que podemos ver aún aunque inactivas en Fuerteventura o bien en diferentes museos de esta isla, sobre todo las recientemente rehabilitadas por el Cabildo de Fuerteventura en el municipio de Betancuria donde en la primera mitad del siglo XX existía la mayor densidad de Canarias de estos artulugios.

A principios del siglo XX, muchas norias antiguas, de ruedas de madera se sustituyen por malacates de fundición; y, los arcaduces de barro o madera enganchados en sogas ahora se cambian por cangilones de metal elevados mediante una cadena de platinas metálicas, siendo por las zonas de La Aldea y Telde (Gran Canaria) donde hubo el mayor número. Actualmente se puede ver un modelo de estas norias de fundición junto a la Torre del Conde en San Sebastián de La Gomera.

4. Industria extractiva del hielo canario: los neveros

El casquete central de cada una de las tres islas más elevadas del Archipiélago (Tenerife, La Palma y Gran Canaria) suele cubrirse periódicamente de nieve por encima de los 1.700 metros de altitud aunque también puede en algunos años descender esta cota, fenómeno que coincide con una ligera variación climática que ha incrementado las heladas en las cumbres, sobre todo en Tenerife entre los siglos XVI y XIX (Martín M, 2010). Estas nevadas generan por un lado perspectivas de ensueño, con fuertes contrastes cromáticos entre plantas, rocas monolíticas y rojizos suelos volcánicos; y, por otro ha propiciado unos curiosos bienes patrimoniales, los *pozos de nieve* o *neveros*, cuya antigüedad parte del año 1694 para los de Gran Canaria, de 1750 para los de Arafo (Tenerife) y de 1778 para el de Fuente Olén (La Palma) aunque la extracción y comercialización de la nieve y el hielo canario es anterior a estas fechas y como actividad controlada, casi siempre, por las instituciones públicas. Los pozos de nieve se fueron abandonaron, según avanzaba los años veinte y treinta del pasado siglo, cuando la demanda de hielo para las actividades pesqueras, portuarias e industriales de helados determinaron la instalación de las fábricas de hielo en Las Palmas, La Orotava y Santa Cruz de Tenerife.

El hielo en piedras o la nieve prensada, se comercializa entre las Islas, entre el siglo XVII (quizás antes) y principios del XX. Se recogía, prensaba en su caso y se guardada en hoyos, cuevas, goros de piedra y en los mencionados *pozos de nieve*. Estos son similares a los localizados en las diversas sierras de la Península Ibérica y otras zonas del área Mediterránea, pues el uso del hielo o de nieve prensada y su consecuente actividad económica se remonta, al menos, hasta dos o tres milenios atrás; primero en la sociedad mesopotámica antigua, luego en la clásica griega y romana, en la árabe califatos abasí y cordobés... Se fue popularizando su uso en la Europa del Renacimiento y con mayor profusión en épocas posteriores hasta llegar a Canarias la moda de refrescos y helados, entre los siglos XVI-XVIII, hasta tiempos actuales con nuevas industrias del hielo que dejó inoperativa las extracciones tradicionales. Pudo haber en Canarias más de 30 pozos de nieve aunque actualmente quedan a simple vista sólo nueve (tres, en Gran Canaria, cinco, en Tenerife y uno en La Palma). Estos eran perforados tanto en suelos de roca volcánica (Gran Canaria) como en zonas de materiales sueltos (Tenerife y La Palma) como arcillas, conglomerados diversos, picones (piroclásticos de efusiones volcánicas más modernas) por lo que, en este caso, el pozo requería a veces un revestimiento interior de muros de piedras seca o en su caso rejuntadas con argamasa de cal.

La nieve se prensaba en moldes (torales) para configurar unos bloques que se iban depositando dentro de estos pozos, en capas separadas unas de otras por una gruesa capa de paja o pinocha. El conjunto de bloques quedaba aislado del fondo del pozo puesto que si era rocoso para discurrir el agua derretida (de los bloques externos) llevaba un orificio de drenaje subterráneo para que por gravedad el agua saliera al exterior o si estaba perforado en zona de materiales sueltos de fácil drenaje el agua se filtraba fácilmente por el subsuelo pero la base del pozo había que rellenarla de una capa de ramaje con o sin empalizada. Pero no siempre se conservaba la nieve prensada en bloques puesto que, en algunos pozos de La Palma, el hielo se iba depositando y prensando por sucesivas capas separadas unas de otras por ramaje y tierra. Lo común pues en estos pozos era la necesidad de un sistema de evacuación del agua producida por el derriete del hielo por su fondo y el cubrimiento de su brocal, también con ramaje, para evitar los efectos del sol y el aire, siempre en modelos diferentes de aislamiento. Pero no sólo se guardaba el hielo en pozos sino también en cuevas y pequeños goros de piedra y además no solo se extraía en las nevadas de la superficie sino que se sacaba en bloques compactos de grietas y huecos transversales que producen nuestros materiales volcánicos desde donde las piedras de hielo se llevaban directamente a los mercados. Los bloques de hielo prensados conservaban años (caso de Gran Canaria que las heladas no son frecuentes) en los pozos gracias a la técnica aislante empleada con hojas de helechos, de pinos (pinocha) y de otras especies arbóreas; pero al sacarlos había que compactarlos nuevamente dentro de cada toral. Estos podían pesar entre 30 y 40 kg. Para todo ello esta industria extractiva empleaba grandes contingentes de mano, a cuyos miembros también se les denominaba como *neveros*; un oficio muy duro al tener que trabajar en terrenos enladerados y a bajas temperaturas. Y, se complementaba con el de los arrieros que debían recorrer kilométricas distancias hasta los lugares de venta del hielo: las *neverías* de las poblaciones, donde este era consumido para fines terapéuticos medicinal y como materia prima para la fabricación de refrescos (limonadas, granizadas, agua fresca...) y mantecados (helados).

De ello quedan como bienes patrimoniales, la documentación histórica y la decena de pozos que subsisten en distintos estados de conservación-protección y la herencia toponímica en el paisaje canario: *Pozos de la Nieve*, *Pico de las Nieves* (Gran Canaria y La Palma); *Los Pozos*, *Lomo de los Pozos de La Nieve*, *Cueva del Hielo*, *Las Grutas* (Tenerife), etc. (Miranda C, 2002, 2003 a-b y 2005) (Merino M, 2005).

4.1. Los neveros de Gran Canaria

En Gran Canaria los pozos de nieve fueron explotados por instituciones como el Cabildo Catedral que tuvo dos, y la Real Audiencia uno desde la segunda mitad del siglo XVII (Miranda Calderín, 2005). De los tres, los dos del Cabildo Catedral están rehabilitados, visitables y ubicados en la banda de San Mateo y al parecer hubo un cuarto pozo aún no localizado.

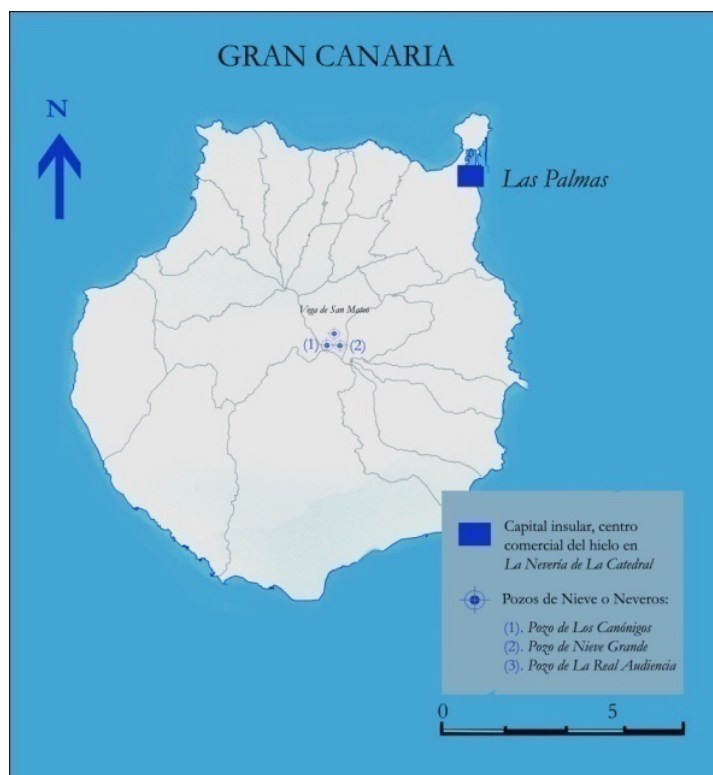


Figura 20.16; Mapa de localización de los neveros de Gran Canaria (Amanhuy Suárez, 2011)

El otro nevero está por la misma zona, a corta distancia y se llega por carretera secundaria que alcanza la zona de los Repetidores y se le conoce como el Pozo de Nieve Grande. Está a 1.902 m de altitud. Es más antiguo (1694), de más capacidad pues conforma una amplia planta cuadrangular con una base de 36 m² capaz de almacenar entonces hasta 188 cargas unos 13.724 kg; como carecía de cobertizo, su brocal solía cubrirse con una empalizada sellada de retamas y arbustos. El Pozo de La Real

Audiencia está en la zona de El Gamonal (Llano del Pozo) a 1.847 de altitud, se encuentra tapado y sin rehabilitar, la tradición oral recuerda de la existencia de otro pozo por esta zona, según nota de la Carta Arqueológica de Gran Canaria (FEDAC).



Figura 20.17; Pozo de Los Canónigos (a 1.912 metros de altura) con cobertizo reconstruido de planta circular. Cumbre de Gran Canaria (Amanhuy Suárez, 2005).

4.2. Tenerife, la isla del hielo

La isla de Tenerife era conocida por los clásicos latinos como *Nivaria*, en alusión a sus nieves perpetuas y desde el siglo XVII había generado una importante industria extractiva del hielo para su comercialización en sus poblaciones y en las demás islas. El incremento de la demanda determinó, hacia 1750, por concesión pública a iniciativa privada, la construcción de los primeros pozos de nieve en la zona de la Caldera de Pedro Gil (Arafo) (1.500 m) y más tarde se levantaron otros por la zona del Volcán de Arafo y ya, en el siglo XIX, más por la Gran Dorsal (Güímar y Arafo) (Miranda C, 2003).

En un principio se transportaba el producto desde los depósitos naturales de las faldas del Teide e Izaña a lomos de mulas. Algunos de dichos depósitos naturales, como la célebre Cueva del Hielo, lo conservaba durante todo el año; mientras que otras cuevas sólo constituían lugares de acopio invernal. Pero ante la elevada demanda del producto, desde finales del siglo XVIII se comenzaron a construir pozos

artificiales en los lugares más propicios de la cumbre de la Isla. Al igual que en Gran Canaria y La Palma, llenaban estos depósitos de nieve durante el invierno y, una vez colmatados, los tapaban con ramajes y varias capas de piedra pómez o picón basáltico, con el fin de conservar el hielo durante muchos meses, aprovechando el poder aislante y refractario de estos materiales volcánicos, hasta el verano, época de mayor demanda y mejores precios. Por lo general tenían estructura cilíndrica, una profundidad de unos ocho metros y un diámetro de alrededor de cinco; y contaban con una escalera de piedra para acceder a su interior (Rodríguez D, *et al.*, 2006).

En Arafo se construyeron al menos 15 neveros. Al parecer, los ocho más antiguos se hallaban dentro de la Caldera de Pedro Gil, en los alrededores del llano de “Las Arenas”, a partir de los 1.500 de altura; los dos más antiguos fueron construidos en 1750 y el más reciente en 1833; pero varios fueron destruidos por el aluvión de 1826 y, de momento, ninguno de los restantes ha sido localizado. En 1775 se construyeron dos en el filo de la cumbre y posteriormente otros cinco en la misma dorsal, todos en la jurisdicción de Arafo y en torno a los 2.000 m de altitud (dos en “Guadameña”, otro en “La Negrita”, dos en “La Grieta” y otro en “Acasme”)(Miranda, 2003).



Figura 20.18; Cueva del Hielo (Santiago Hernández Sánchez, 2008)

En la primera mitad del siglo XIX estaban en pleno funcionamiento en la cumbre de La Orotava por lo menos tres o cuatro pozos (probablemente los de Izaña), con los que se cubrió durante años la demanda de hielo de la población. El Ayuntamiento obligaba a los neveros a pagar un impuesto como industriales y en 1857 fijó el lugar donde se podían construir otros ocho pozos, aunque la ubicación exacta se concretó al año siguiente (la barranquera del Llano de la Rosa, naciente del Salto de Bernardino, mitad de la Montaña de la Fuente de la Vaca, casita del Portillo, naciente del Roque de Caramujo, poniente del mismo roque, montaña del Cerrillar y barranco que baja de Maja), todos por encima de los 2.100 m, pero de los que no existe constancia que llegaran a construirse (Miranda C, 2003).

En la cumbre del municipio de Güímar probablemente se construyeron algunos pozos, pero solo tenemos constancia de uno de ellos ubicado cerca de la Fuente de Mal Abrigo, ya en la cumbre de Izaña que forma conjunto con los tres cercanos de la vertiente norte de esta zona (La Orotava), ya en el Parque Nacional del Teide. Estos son los cuatro neveros que se conservan en la actualidad en esta isla, y que en 2009 fueron declarados *Bien de Interés Cultural* en la categoría de *Sitio Etnológico* (BOC, 047, 10-III-209-331). Uno de ellos es el ubicado en la falda del Sureste (Güímar), en Lomo del Pozo (2.178 m), cerca de la Fuente de Mal Abrigo, a la izquierda de la carretera general que sube a Las Cañadas (TF 24- km 35); y los tres de La Orotava están poco más adelante, a unos 700 m por la misma carretera, cuando ésta pasa a la otra vertiente, en la ladera del Observatorio de Izaña o Lomo de Los Pozos, de ellos dos están junto a la vía (2.260 m) y otro más arriba a unos 100 m (2.312 m). Estos cuatro pozos tienen una misma configuración arquitectónica: planta circular con diámetro de seis metros y profundidad variable de seis a ocho metros, revestimiento interno con cantería basáltica tipología, con escaleras de lajas incrustadas en la pared para su acceso.

Como decíamos el hielo se conservaba muy bien en esta isla, en su estado natural, gracias a las alturas y la existencia de ventisqueros naturales, grietas y oquedades, en cotas superiores a los 2.000 m de altitud de las que se extraía con herramientas adecuadas y configuradas en bloques denominados “piedras de hielo”. Así ocurría en Montaña Rajada, Roques Blancos y Pico Viento, aunque la más conocidas es la *Cueva del Hielo* (La Orotava); un tubo volcánico situado a unos 3.300 metros de altitud, aproximadamente a unos 500 metros sobre el valle que forma Altavista, que conforma una caverna de unos 55 metros de longitud, unos 9 metros de altura y unos 15 metros de ancho. (Miranda, 2003) (Rodríguez N, 2003).

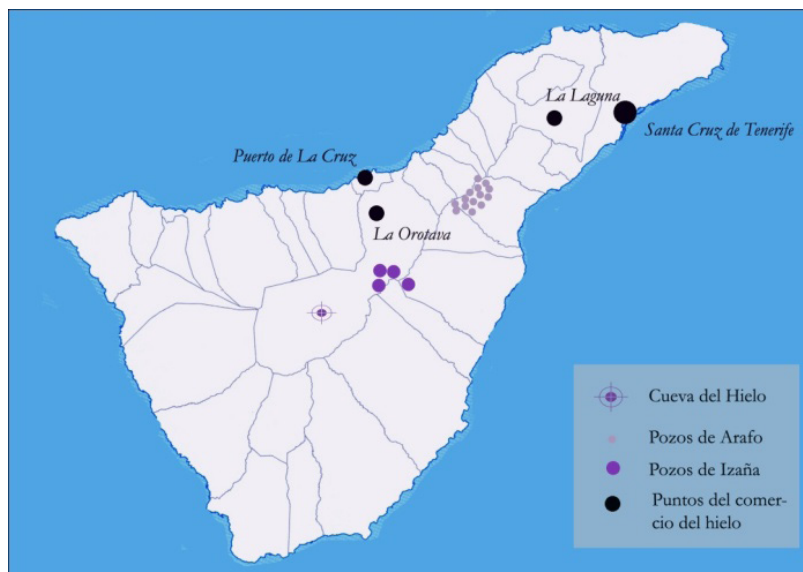


Figura 20.19; Mapa de localización de los pozos de nieve de Tenerife y de la Cueva del Hielo en el Teide (A. Suarez, 2011).

4.3. Pozos de nieves en La Palma

En San Miguel La Palma hubo cuatro pozos, todos al nordeste de la Isla, en las estribaciones de la parte externa de la Caldera de Taburiente, entre los municipios de Puntallana y Santa Cruz de La Palma, en una zona comprendida en la cota de los 1.700-2.240 metros de altura.

En la misma cumbre del Pico de Las Nieves (2.240 m) se hallaba un pozo y en la falda de esta montaña, en la confluencia con el Llano de las Vergas, a unos 2.000 metros de altura, otros dos. Según referencias orales, porque no han sido localizados aún, estos tres pozos tenían planta circular con diámetro de 2 metros y profundidad de 3 a 4 metros y carecían de muro interior de revestimiento. Debieron ser muy antiguos y en ellos se guardaba la nieve prensada por capas no en bloques de torales.



Figura 20.20; Pozo rehabilitado, en el área recreativa de Fuente de Olén (Pais Pais, 2011)

El cuarto conocido como *Pozo de la Nieve* es el que subsiste, rehabilitado y visitable por hallarse en el área recreativa de Fuente de Olén. Lo construyó el Cabildo de la isla en 1778. Está a nivel de los 1.700 metros de altitud, en Llano de las Vacas-laderas del barranco de Las Raíces, un área de pinar con orientación sureste, cerca de la carretera que sube de Santa Cruz (LP-22, km 21) al Roque de Los Muchachos. Está perforado entre terreno de materiales sueltos y un poco de sustrato rocoso al fondo. Conformar una estructura cilíndrica de cuatro metros de diámetro por cinco metros de profundidad. Su interior está forrado con cabezas de piedra y cogidas sus juntas con argamasa de cal, hasta una base de primero de muro de piedra seca y luego de ripios sobre el que se apoya la obra de fábrica de cantos y mampostería ordinaria, base de materiales sueltos que servía de drenaje hacia el exterior del deshielo de los torales. Por esta banda el pozo presenta en su exterior un muro circular también de más de 50 cm de ancho y 3 m de altura que sirve de refuerzo al muro interior de cal y canto y a su vez como aislante.

La explotación de la nieve, como en el resto de las islas, por estar en bienes públicos la controlaba y regulaba el Cabildo, siendo un recurso más para los ingresos de sus maltrechas arcas que probablemente cedía en arriendo. El área de recogida se situaba en las faldas de esta montaña. Según fuentes orales, en Santa Cruz de La Palma había dos centros de venta del hielo hasta los años veinte y treinta del siglo pasado;

uno de ellos era la Fonda de doña Claudia, donde además vendía refrescos y limonadas y además disponía para la conservación del hielo en la Fonda una especie de pozo. Además de otros pueblos se acudía a Santa Cruz de La Palma a comprar hielo cuyo transporte se hacía en cajas con aislamiento de serrín y a lomos de bestias (Merino M, 2005).



Figura 20.21; Mapa localización de los pozos de nieve de La Palma (A. Suárez, 2011).

5. Fuentes agrias y termales

La naturaleza volcánica de Canarias ha determinado el nacimiento de manantiales de agua con propiedades minero-medicinales, gracias a contenidos diversos, según zonas, como hierro, silicato, gas carbónico, hidrosulfúrico, etc. en las islas de La Palma, El Hierro y Gran Canaria, donde se han llegado a localizar en su conjunto hasta

tiempos actuales unas 52 captaciones (Baeza R. *et al.*, 2001), por lo que se considera como la comunidad autónoma del Estado español con mayor densidad y calidad de aguas termales y minero-medicinales.

Desde muy antiguo en Canarias y aún más atrás en otras sociedades protohistóricas y aún más extendido su uso en la cultura greco-romana se usaron las aguas minerales y termales con fines terapéuticos. El ingeniero-arquitecto romano Marcos Vitruvio nos deja en su obra maestra una interesante y prolija información en el capítulo «De las aguas calientes y de la naturaleza de varias fuentes, ríos y lago» (Edic, 1997). Las aguas minerales y termales canarias alcanzaron desde los primeros años de la colonización europea una gran fama en todas partes del mundo como curativas de enfermedades de piel, venéreas, estomacales... La primera en adquirir celebridad fue la *Fuente Santa* en Fuencaliente (La Palma), por desgracia sepultada por el Volcán de San Antonio en 1677 y recuperada recientemente por el Gobierno de Canarias. Historiadores, entre otros, Gaspar Frutuoso, fray José de Sosa (siglos XVI-XVII) y Viera y Clavijo (siglo XVIII) que las estudió con profundidad (Edic, 1982) escribieron desde muy antiguo sobre propiedades terapéuticas de las llamadas en Canarias *aguas agria*.

En estos manantiales de aguas minerales y termales se realizaban baños curativos, luego se construyeron balnearios y, más tarde, se explotó industrialmente las aguas embotelladas. A finales del siglo XIX, cuando el desarrollo del capitalismo industrial popularizó en Europa los balnearios de aguas medicinales entre las clases acomodadas, llegaron a Gran Canaria los primeros turistas a probar las propiedades curativas de nuestras aguas agrias y termales en afecciones reumáticas, venéreas, estomacales y de la piel... Estos se levantaron en Gran Canaria por los parajes de laurisilva de Azuaje de Firgas (1868), Teror (1881) y Los Berrazales de Agaete (1880), y en la misma costa como el de Tinoca, donde se construyeron pequeños complejos hoteleros en entornos naturales de extraordinaria belleza y en Tenerife a principios del siglo se haya el *Thermal Palace* (Puerto de La Cruz) a lo que se une la pequeña pensión de Sabinosa (El Hierro). Más tarde, y hasta la actualidad, se explotaron como aguas minero-medicinales de mesa; de aquí nace una significativa oferta, entre otras: *Aguas de San Roque* (1916), *Aguas Minerales de Firgas* (1929), *Aguas Minerales de Agaete* (1928), *Fuente Agria de Teror* (1928) y *Aguas de Sabinosa* (1945). Pero la lista de fuentes agrias y medicinales es más amplia pues se hallan en primer lugar las aguas de la comarca de Chasnia-Vilaflor (Sur de Tenerife), de los Altos de Guía (Gran Canaria), Costa de Lairaga (Gran Canaria), Mafur de Agüimes (Gran Canaria), San Telmo de Puerto de La Cruz (Tenerife), El Rosario (Tenerife) etc. de lo que existen varias referencias bibliográficas (Bosch M., 1947, ; de la Puerta C., 1897; Navarro y Alonso, 2006, etc.).

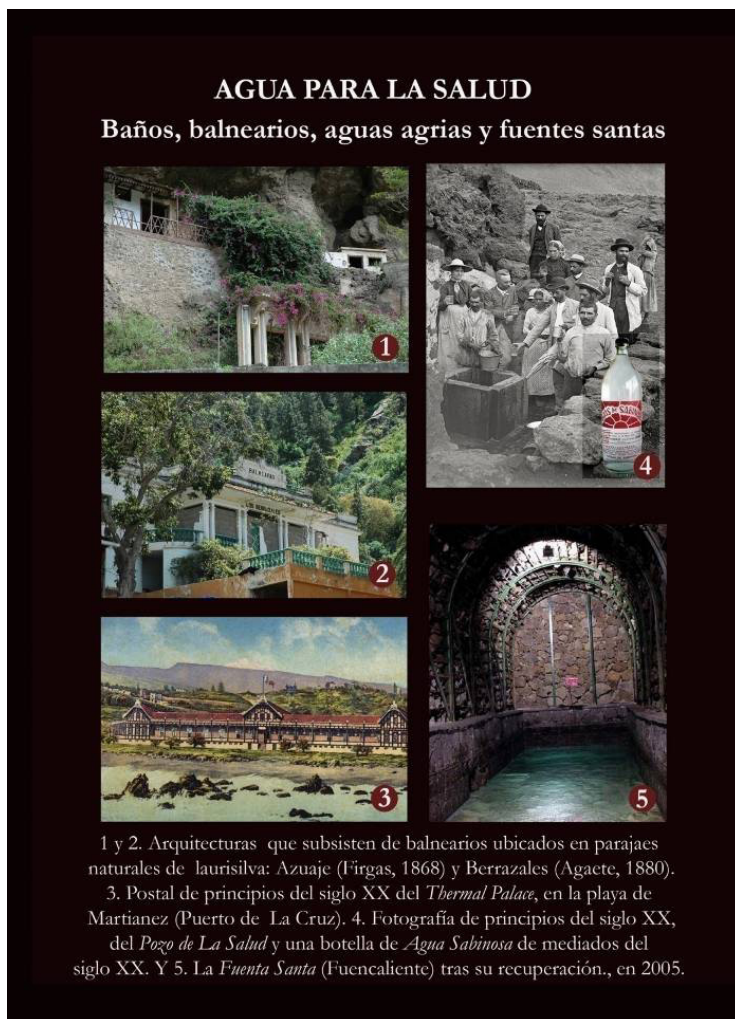


Figura 20.22; Fotomontaje de los balnearios y fuentes de Canarias. (A. Suárez, 2011)

Por citar alguna de las tantas historias del *agua agria* canaria lo hacemos con el *Pozo de la Salud* o *Pozo de Sabinosa* perforado entre 1702 y 1704 para el abastecimiento pero resultó de aguas muy salobres que solo el ganado bebía hasta que se descubrió su potencial terapéutico y se hizo célebre en Canarias, Europa y América adonde se llegaron a exportar, en el siglo XIX. A principios del siglo XIX se realizaron los primeros análisis químicos y, luego hacia 1843 se declararon oficialmente “minero-medicinales”. Cuando el turismo de salud se hace moda en Europa a finales del siglo XIX, el *Pozo de Sabinosa* aparece en las principales guías turísticas, atrae

a escritoras como Olivia Stone, a fotógrafos de la época y se acondiciona su entorno para baños curativos y oferta alojativa (pensión). A mediados del siglo XX se embotellan sus aguas y en 1995 se funda el actual *Hotel-Balneario Pozo de la Salud* (Teixidor C., 2010).

Pero si todo ello constituye un extraordinario patrimonio cultural y natural canario más aún en el aspecto geológico, histórico-mítico y curativo lo es la *Fuente Santa* de Fuencaliente (La Palma), sepultada por la erupción del volcán de San Antonio en 1677 y recuperada en 2005 gracias a un interesante proyecto de ingeniería, hecho a base de un galería con ramales (Soler L., 2007). Conocida por los antiguos habitantes de La Palma, los benahoaritas y extendida su fama por todo el mundo conocido, las aguas termales de la *Fuente Santa* generaron hasta su desaparición milagrosas curaciones en enfermedades de la piel, hasta el punto que era exportada en barriles a las Américas y generaba riqueza económica a la Isla. Su desaparición fue considerada como una catástrofe, se cantó en décimas y romances por Canarias, Europa y América. En su estado original era un manantial ubicado en la misma orilla del mar del que emergía agua cargada de sales y a temperaturas de 40°C, que en marea llena se recubría por el agua del mar. Tras la erupción volcánica de 1677 la fuente quedó sepultada y el paisaje de la costa, su entorno, se desfiguró por completo. Hubo intentos de búsqueda desde el siglo XVIII hasta el proyecto que la descubrió, un hito a comienzos del siglo XXI para la historia de La Palma.

6. Patrimonio Hidráulico en Canarias. Cultura, gestión patrimonial, implicaciones didácticas e investigación

6.1. El Patrimonio intangible

La cultura del agua en Canarias no sólo ha dejado una profunda huella en su historia, su geografía y tecnología, sino también en el habla, la toponimia, la medicina popular e incluso en la visión cósmica y las creencias religiosas desde la época de las sociedades indígenas canarias, cargada de una gran variedad de ritos del agua en Gran Canaria, Tenerife, La Palma y seguramente en otras islas e incluso conectado a manifestaciones rupestres.

La larga tradición y cultura del agua en Canaria ha generado variados oficios, desde que en los siglos XV y XVI, llegaron los primeros maestros del agua procedentes de Madeira para realizar las primeras infraestructuras hidráulicas entorno a los inge-

nios azucareros y poblados anexo, junto a una corriente tecnológica para la perforación de los primeros pozos y minas de agua procedente de la cultura árabe de Al Ándalus.

Así surgieron las profesiones de poceros, piqueros, acequeros o repartidores..., y los correspondientes sistemas de medidas y distribución del agua y otras estrategias antiguas, que con el tiempo fueron creando una serie de conocimientos y saberes populares que la sociedad contemporánea, por desuso, empezó a olvidar. Y ello constituye un valioso patrimonio intangible del agua que requiere su registro e inventariado por comarcas o por islas.

Como en todas las sociedades tradicionales, el análisis continuado a lo largo del ciclo del año de los fenómenos atmosféricos, marcó una pauta muy importante en la vida de las personas del campo. Ello conforma el otro sector del patrimonio cultural intangible relacionado con el agua, tales como las señas y aberruntos sobre la flora, la fauna, los astros... para predecir lluvias y sequías, que aún se mantienen en el campo dentro del calendario agrícola tradicional. Una de las más populares predicciones son las denominadas cabañuelas conocidas así en la península Ibérica y zonas de América a métodos de predicción del tiempo atmosférico. La etimología del término procede de la tradición judía hispana concretamente de la Fiesta de Los Tabernáculo o Cabañuelas de Toledo (siglo XV) lo que entronca con toda la cultura antigua de Mesopotamia y del Mediterráneo también puesto que griegos y romanos tenían la costumbre de la predicción del tiempo mediante la observación de fenómenos diversos.

Son muchas y están estudiadas en una prolija literatura etnográfica canaria que ya Álvarez Rixo, personaje del siglo XVIII y XIX, hacía constar en sus relatos sobre Cabañuelas o experiencias convenientes para el año del labrador (Hernández G, 2006) e incluso, entre otros autores las aportaciones de la tradición oral para las islas secas en este asunto de Aberruntos y cabañuelas en Fuerteventura, (Navarro A y Navarro R, 1982) o aspectos de la oralidad lanzaroteña referentes a este tema etnográfico recogidos por el Equipo de Investigación «La Cultura del Agua en Lanzarote» (2006). En resumen se hace referencia a unas determinadas señas tanto en el aspecto de la floración de determinadas plantas, actitudes o afecciones en animales (hormigas, cabras...) y, sobre todo, la posición de los astros sobre todo del lucero Venus como del tiempo atmosférico en determinadas épocas del año sobre todo en el solsticio de verano (por San Juan) y en el equinoccio de otoño (por San Miguel) que se relaciona a su vez con el calendario religioso.

Desde la sociedad indígena hasta tiempos recientes la sociedad tradicional siempre creyó en la intersección divina sobre ciclos del tiempo. Los primeros cronistas de la Conquista dejaron constancia de ritos y plegarias de la sociedad aborígen a las divinidades superiores en los ciclos de sequía y calamidades, como luego quedan registrados desde los primeros siglos de la Colonización europea (transferencia de la milenaria cultura mediterránea) hasta tiempos recientes, tales como continuas rogativas, procesiones y bajadas de vírgenes y santos ante hambrunas, epidemias y, sobre todo en los continuados ciclos de sequía que históricamente azotan a Canarias, con más efecto en las tres islas orientales (Hernández G, 2006 y Suárez Grimón, 2007). Aún se mantiene en las personas mayores estas creencias cada día aminoradas y hacia la extinción por los avances tecnológicos de la meteorología. En estas creencias incluimos el estudiado cariz mágico, regenerador y misterioso de fuentes y manantiales, o de algún árbol santo del agua como el estudiado Garoé, en El Hierro.

6.2. El patrimonio lingüístico

El habla común, la toponimia, el refranero y las expresiones populares canarias recogen centenares de alusiones o derivaciones relacionadas con el agua, las fuentes, los chorros y las ingenierías, arquitecturas y medidas hidráulicas. Esta indudable riqueza del español hablado en Canarias presenta una gran variedad de aspectos lingüísticos específicos entre islas y comarcas de cada una de ellas. Pero los cambios socioeconómicos recientes del nuevo mundo global, con el abandono de las tradicionales tareas del campo, están generando, lentamente, la desaparición del patrimonio lingüístico relacionado con el agua, incluso la propia toponimia en los espacios más alejados de nuestros montes, antes transitados por caminantes, pastores, orchilleros, carboneros y leñadores. La cultura del agua en Canarias tiene aún un reflejo lingüístico extraordinario, que, en una sencilla taxonomía, podemos estructurar en dos apartados, siguiendo los trabajos del profesor Ortega Ojeda en el 2006:

A. Hidrónimos. Conforman un conjunto de miles de palabras, frases y refranes relacionados con el tiempo atmosférico, como *barda* o *panza de burro* para mencionar en Gran Canaria al estrato nuboso del alisio; con la lluvia, en concreto como *zarpa-zo* (aguacero), en toda Canarias; con fuentes y manantiales, como *chorro*, *pila*...; con depósitos de agua, como *mareta* en sus diferentes acepciones en cada una de las islas, *tanque*, *poza*, *gavia*, *alcogida*, *poceta*, *eres*...; canalizaciones de todo tipo, tales como *acequia*, *tajea*/*atarjea*, *canal/caño*...; con medidas de fluidez o de capacidad

en su caso, como *azada* (con diferentes acepciones en Gran Canaria), *pipa* (en las islas occidentales) *hilo*...; con la distribución y el riego agrícola, tanto en palabras como en expresiones, tales como *dula*, *trancar la bomba del tanque*, *virar la tor-na*...; además de otra amplia fraseología vinculada directa o indirectamente con el agua, en que cada isla, cada municipio y cada localidad tienen un variado conjunto, como, por ejemplo, *llover a chuzos* y, por último, el amplio campo de la paremiología y refranero alusivos al agua.

B. Hidrotopónimos. Más rico aún es el conjunto toponímico canario relacionado con el agua y sus actividades. Conlleva cientos de nombres propios para ciudades, pueblos, cauces, caideros (saltos de agua). Entre algunos de esos miles de hidrotopónimos canarios, señalamos a la histórica ciudad y “Patrimonio de la Humanidad” de *San Cristóbal de La Laguna*, la indígena *Aguere* (‘laguna’ en guanche), conformada junto a un extenso humedal, hoy desaparecido (Criado Hernández, 2002); *El Tanque* (municipio del norte de Tenerife), *Pinolere* (‘pino del eres’, localidad de las medianías del Valle de La Orotava), *Caideros* (localidad del norte de Gran Canaria, perteneciente al municipio de Gáldar) o los miles de nombres propios que comienzan por la *Fuente de ... El Chorro de... Piletas de..., La Mareta de... El Albercón de...* etc.

6.3. Retos patrimoniales, asociativos, didácticos y bibliográficos

La producción de agua de forma no convencional a partir de agua salada, así como los riegos artificiales y la reutilización de las aguas residuales han sido las grandes novedades hidráulicas de finales del siglo XX, en un momento en que sobreexplotado el acuífero, comienzan a cambiar por completo las estructuras y la gestión de las agua. A la vez se realizan entre otros trabajos, los primeros estudios científicos y proyectos de planificación tales como el *SPA-15*, 1975; el *MAC-21*, 1980 y los *Planes Hidrológicos* de cada una de las siete islas, en el marco de una nueva legislación del agua como un bien público no sometido a especulaciones del capital privado.

La gran novedad de la desalación de aguas ha sido su aplicación al sector agrícola que ha dejado de mirar al cielo para conseguir el recurso fundamental del agua. Pongamos dos ejemplos claros y evidentes: las islas orientales, Lanzarote y Fuerteventura han solucionado a partir de finales de los años sesenta el problema del abastecimiento de agua a la población y polos de desarrollo turístico con la implantación progresiva de desaladoras; en el Norte de Gran Canaria en los años y meses de mayor sequía el mercado del agua controlado por los “aguatenientes” podía

alcanzar, antes de 1995, un precio de 9.000 pesetas la hora de una azada (9 L/s), es decir 32 metros cúbicos; ahora en se ha reducido a la tercera parte. En 1999, la Isla ya producía 193.000 m³/día de agua desalada tanto del mar como de pozos salobres, con los sistemas de ósmosis inversa, multietapa *Flash* y compresión a vapor, siendo el primero el más generalizado. El incremento actual supera una producción de 200.000 m³/día.

Por otro lado están los planes de depuración de aguas residuales, que arrancan a partir de 1974, cuando fue aprobado por el ministerio de Obras Públicas el Plan de Infraestructura Hidráulico-Sanitario que abarcaba la ejecución de obras de alcantarillado, depuración de aguas residuales, abastecimiento y distribución de agua potable para las islas con mayor problema y luego extensible a las demás. Los Consorcios Insulares gestionan las principales.

Los riegos artificiales representan otro de los capítulos finales de las estrategias hidráulicas, que a lo largo de los siglos mantuvo las formas de la resfriada y los riegos por surco y a manta. En la década de 1970 comenzó a introducirse con fuerza los riegos artificiales con el desarrollo de la tecnología del plástico en materia hidráulica. Primero con riego por aspersores y luego por goteros, la agricultura insular terminó a finales de los 80 con la implantación generalizada de estos sistemas de riego. En los últimos años del siglo XX, se da un nuevo avance con la hidroponía, cuyas primeras experiencias habían tenido lugar, en cultivos de tomates, en los años setenta.

Por último, en el plano de la arquitectura hidráulica, se vuelve a replantear la experiencia de los antiguos maestros del agua, en los casos de acumular las reservas de agua, como lo es la tecnología de las charcas embutidas en el terreno arcilloso, siguiendo la técnica tradicional. Es un tipo de embalse que se está generalizando en tiempos recientes con la única innovación del plástico impermeabilizante y el empleo de tuberías de polietileno en la evacuación y conducción de las aguas. Destaca, como ya hemos estudiado, el proyecto de dos grandes charcas en distintos niveles para la generación de energía eléctrica a través de una central hidroeléctrica.

Y si en toda esta reestructuración de los recursos hidráulicos canarios, desde la nueva perspectiva socioeconómica de la “sostenibilidad” y de la “calidad y protección ambiental”, comienza a generarse en las Islas Canarias una nueva cultura del agua, resulta que los orígenes históricos y el patrimonio hidráulico generado a lo largo del tiempo, resulta por un lado de extrema necesidad de protección y por otro una nueva puesta en valor.

En efecto, a modo de conclusión para todo nuestro trabajo, digamos que si el Patrimonio Hidráulico en Canarias se halla en proceso acelerado de destrucción, ante su desuso por el cambio del modelo económico con la consiguiente crisis de la agricultura, la que ha determinado de una forma u otra casi la mitad de los bienes patrimoniales tangibles, cada día deben ser mayores las iniciativas para su protección y rehabilitación, desde varias líneas. Por un lado están los catálogos o inventarios de protección y las pocas declaraciones como Bienes de Interés Cultural. Gran Canaria es la única isla que ya tiene confeccionado todos los catálogos municipales del patrimonio etnográfico, donde se incluyen unos 5 mil bienes del patrimonio hidráulico, aunque la realidad es superior por lo que se haya en continua revisión (<http://www.cartaetnograficagc.org/>). Y, por otro, tenemos la labor investigadora y de difusión de los bienes y de la cultura hidráulica desde las universidades y entes particulares. Destacamos el proyecto en marcha del *Museo del Agua* en la mencionada Noria de Jinámar (Telde-Gran Canaria) con fondos europeos; la propuesta escolar de rehabilitación de la *Central Electrón* (La Palma); la rehabilitación de varios molinos de agua y aeromotores para extracción de aguas subterráneas, así como las denominadas *Rutas del Agua*, itinerarios didácticos establecidos en varios municipios canarios (Aruca, Telde, Santa Lucía de Tirajana, La Orotava, El Tanque, La Guancha...); la rehabilitación de los aeromotores y pozos en municipios de Fuerteventura; la atención hacia la cultura del agua de algunos museos y centro de interpretación como los de Betancuria (Fuerteventura) o Guayadeque (Gran Canaria); entre otras más iniciativas. Además, el estudio del agua en Canarias comienza a partir de 1990 a tener resultados desde perspectivas técnicas, históricas, etnográficas y culturales, extremo este, el patrimonial cultural, que cuenta con una extensa pero desperdigada bibliografía.

Pero la fuerza y razón de los estudios realizados, de las propuestas y trabajos son insuficientes si el Patrimonio Hidráulico no es asumido como activa puesta en valor por toda la sociedad civil y por los rectores de los gobiernos insulares y municipales empezando por eficaces medidas protectoras que no son siempre las de la aplicación de normas legales y terminando por la formación de valores en nuestras escuelas, institutos y universidades incluso.

Bibliografía consultada y referencias

- BAEZA RODRÍGUEZ-CARO, J.; LÓPEZ GETA, J.A. y RAMÍREZ ORTEGA, A. (2001): *Aguas Minerales en España*. «6.6. Aguas Minerales en Canarias». Instituto Geológico Minero de España, Madrid, pp. 185-196.
- BENÍTEZ PADILLA, S. (1959): *Gran Canaria y sus obras hidráulicas*. Las Palmas. Castro Núñez, U. (2007): "El Calabazo", en revista digital bienmesabe.org. nº 175, 9 de Septiembre de 2007 (c. 11-IX-2011):
<http://www.bienmesabe.org/noticia/2007/Septiembre/el-calabazo>

- BOSCH MILLARES, J. (1947): «Las aguas mineromedicinales de Gran Canaria», en la revista *Isla*, nº 3.
- CABILDO DE FUERTEVENTURA-CAJA DE CANARIAS (2011): El paisaje del agua en Fuerteventura. Madrid.
- CABILDO DE GRAN CANARIA-FEDAC: Carta Etnográfica de Gran Canaria. <cartaetnografica@fedac.org>
- CRiado HERNÁNDEZ, C. (2002): *Breve e incompleta historia del antiguo lago de la ciudad de San Cristóbal de La Laguna*. Ayuntamiento de San Cristóbal de La Laguna. Concejalía de Cultura y Patrimonio Histórico-Artístico.
- DÍAZ HERNÁNDEZ, R. (2008): “El paisaje agrario en Gran Canaria” y “Agua, patrimonio y paisaje en Canarias”, en *La cultura del agua en Gran Canaria*, Consejería de Obras Públicas y Transportes del Gobierno de Canarias, pp. 55-72 y 117-142.
- DÍAZ RODRÍGUEZ, J. M. (1989): *Molinos de Agua en Gran Canaria*. Las Palmas de Gran Canaria.
- EQUIPO DE INVESTIGACIÓN «LA CULTURA DEL AGUA EN LANZAROTE» (2006): “La voz de una isla seca. Patrimonio oral”, en *La cultura del agua en Lanzarote*. Consejería de Obras Públicas y Transportes del Gobierno de Canarias-Cabildo de Lanzarote. Islas Canarias.
- EXPÓSITO SUÁREZ, M.; GARCÍA CASANOVA, G.; GÓMEZ PESCOSE, C. E.; MARTÍN PÉREZ, A. y MOROS GIL, M. (1999): *La Cultura del Agua en Canarias. Materiales Curriculares*. Premios Innovación. Consejería de Educación del Gobierno de Canarias.
- FERNÁNDEZ ARMESTO, F. (1997): *Las Islas Canarias después de la conquista. La creación de una sociedad colonial a principios del siglo XVI*. Ediciones del Cabildo Insular de Gran Canaria. Cap. V. “Las aguas de riego”, pp. 153-179. Las Palmas de Gran Canaria.
- FERNÁNDEZ GONZÁLEZ, E.: (1984): “Curiosidades sobre captaciones de agua en Gran Canaria”, en *el Campo. Boletín de Información agrícola*. Banco de Bilbao. Bilbao. [Original en Servicio Hidráulico, LAS PALMAS, legajos sueltos de presas, para el congreso].
- FRUTUOSO, G. (2004): *Descripción de las Islas Canarias. Capítulos IX al XX del libro I de Saudades da Terra*. Traducción y notas de Pedro Nolasco LEAL CRUZ, Edic. CCPC y otros.
- GALVÁN GONZÁLEZ, E. (1996): *El abastecimiento de agua potable a Las Palmas de Gran Canaria: 1800-1946*. Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria. Las Palmas de Gran Canaria.
- GLICK, T.F. (1972): “The Old World Background of The Irrigation System of San Antonio, Texas”, en *Southwestern Studies Monograph* Nº 25. The University of Texas at El Paso. Texas Western Press.
- GÓMEZ GÓMEZ, M.A. (2006): «La vida en torno al agua. Usos y aprovechamientos históricos», en *Agua del Cielo. Documentos para la Historia de Canarias*. Gobierno de Canarias. Dirección General del Libro, Archivos y Bibliotecas. Archivo Histórico Provincial de Santa Cruz de Tenerife. San Cristóbal de La Laguna.
- GÓMEZ GÓMEZ, M.A. (2009): «Aprovechamiento del agua en Canarias durante antiguo régimen» (en línea). (Islas Canarias, España), Mayo 2009 (ref. 10 de Junio 2009), en revista *Canarii*. Disponible en World Wide Web; <<http://www.revistacanarii.com/canarii/15/aprovechamiento-del-agua-en-canarias-durante-el-antiguo-regimen>>
- GÓMEZ LEÓN, R. (2001): “Agua, sudor y lágrimas: Pinolere y el trabajo en las galerías”, en *El Pajar. Cuadernos de Etnografía Canaria*, La Orotava, pp. 4-25.
- GONZÁLEZ GONZÁLEZ, J.J. (2005): *Tengamos agua y lo tendremos todo. Las grandes presas de Gran Canaria*. II Congreso Nacional de Historia de las Presas. Sociedad Española de Presas y Embalses. Ministerio de Medio Ambiente, Burgos. http://bdigital.ulpgc.es/digital/texto/pdf/0314959_00000_0000.pdf.
- GONZÁLEZ GONZÁLEZ, J.J. (2008): *Construcción de la presa de la Cueva de las Niñas en Majada Alta, Gran Canaria, 1930-1958*. Comunidad de Regantes de la Presa de la Cueva de Las Niñas. Las Palmas de Gran Canaria.
- GONZÁLEZ GONZÁLEZ, J.J. (2008): “Las grandes presas de Gran Canaria. Toponimia, propiedad, tipologías y construcción”, en *La cultura del agua en Gran Canaria*, Consejería de Obras Públicas y Transportes del Gobierno de Canarias. Las Palmas de Gran Canaria, pp. 143-166.
- GONZÁLEZ GONZÁLEZ, J.J. (2009): *Construcción, recrido e incidente de la presa de Martinón (San Lorenzo)*. Las Palmas de Gran Canaria.

- GONZÁLEZ GONZÁLEZ, J.J. (2009): *Siete presas, nueve estanques y una tubería. Cortijo de Samsó-Tamadaba, Cortijo de Samsó-Tamadaba. Gran Canaria, 1907-2009*. Las Palmas de Gran Canaria.
- GONZÁLEZ GONZÁLEZ, J.J. (2009): *La presa de Las Cuevas de Las Niñas en Majada Alta. Construcción, estabilidad, obra y terreno. Gran Canaria, 1930-2009*. Las Palmas de Gran Canaria.
- GONZÁLEZ GONZÁLEZ, J.J. (2010): *Canales y tuberías hasta 1972. Gran Canaria. Un inventario de bienes de interés etnográfico...* <http://www.presasengrancanaria.com/p/descarga-de-articulos.html> (c. 15-XI-2011).
- GONZÁLEZ MORALES, A. (1993): "Aprovechamientos de las aguas y sistemas de riego en Fuerteventura", en *V Jornadas de Estudios sobre Fuerteventura y Lanzarote*, Servicio de Publicaciones del Cabildo Fuerteventura, Tomo II. Puerto del Rosario, pp. 13-40.
- GONZÁLEZ MORALES, A. (2006): *El agua en Lanzarote*. Anroart Ediciones. Las Palmas de Gran Canaria.
- GONZÁLEZ RODRÍGUEZ, J. M. (1991): "Tecnología popular tradicional de los sistemas de riego en Canarias", en *Anuario de Estudios Atlánticos*, nº 37, pp. 467-497. Las Palmas de Gran Canaria.
- GONZÁLEZ RODRÍGUEZ, J. M. (2006): "De gruesas, dulas, cantoneras y otros sistemas de regulación del caudal en los nacientes y atarjeas de Canarias", en *La Cultura del Agua*, Anroart Ediciones, Las Palmas de Gran Canaria, pp. 251-268.
- GONZÁLEZ RODRÍGUEZ, J. M. (2009): "El caso de Lanzarote, la obsesión por el agua" en *Canarii*, nº 11, mayo de 2009. Las Palmas de Gran Canaria.
- GONZÁLEZ RODRÍGUEZ, J.M. (1991): "Tecnología popular tradicional de los sistemas de riego en Canarias" en *Anuario de Estudios Atlánticos*, nº 37, pp. 467-497. Las Palmas de Gran Canarias.
- GONZÁLEZ RODRÍGUEZ, J.M. (2010). *El agua en Canarias. Una visión histórica. Catálogo*. Instituto de Estudios Canarios-Instituto de Estudios Medievales y Renacentistas de La Universidad de La Laguna. San Cristóbal de La Laguna.
- GONZÁLEZ NAVARRO, J. (1999): *Las salinas tradicionales de Gran Canaria*. FEDAC. Cabildo de Gran Canaria.
- GONZÁLEZ NAVARRO, J. (2008): «El patrimonio hidráulico en la prehistoria de Gran Canaria», en *La cultura del agua en Gran Canaria*, Consejería de Obras Públicas y Transportes del Gobierno de Canarias. Las Palmas de Gran Canaria, pp.25-34.
- HENRÍQUEZ SÁNCHEZ, M^a. T. (1997): «Destiladera», en *Gran Enciclopedia Canaria*. Tomo V. Ediciones Canarias. Santa Cruz de Tenerife, p. 1278.
- HERNÁNDEZ GONZÁLEZ, M. (2000): "Los artesanos canarios en la Venezuela colonial: los constructores de acequias" en *El Pajar. Cuadernos de Etnografía Canaria*. Nº 7. pp. 47-49. La Orotava. Santa Cruz de Tenerife.
- HERNÁNDEZ GONZÁLEZ, M. (2001): "Las labores canarias de piedra en América" en *El Pajar. Cuadernos de Etnografía Canaria*. Nº 9. pp. 134-137. La Orotava. Santa Cruz de Tenerife.
- HERNÁNDEZ GONZÁLEZ, M. (2000): "Los artesanos canarios en la Venezuela colonial: los constructores de acequias", en *El Pajar. Cuadernos de Etnografía Canaria*, nº 7, pp. 47-49. La Orotava. Santa Cruz de Tenerife.
- HERNÁNDEZ GONZÁLEZ, M. (2001): "Labores canarias de piedra en América (las destiladeras y las acequias)", en *El Pajar. Cuadernos de Etnografía Canaria*, nº 9, pp. 134-137. La Orotava. Santa Cruz de Tenerife.
- HERNÁNDEZ GONZÁLEZ, M. (2006): "Manifestaciones religiosas de la acción del agua en la sociedad canaria del Antiguo Régimen", en *La Cultura del Agua*, Anroart Ediciones, Las Palmas de Gran Canaria, pp. 190-249.
- HERNÁNDEZ GUTIÉRREZ, S. (1998): *Iconografía del Árbol del Agua*. Santa Cruz de Tenerife.
- HERNÁNDEZ GUTIÉRREZ, S. (2006): "Agua y arquitectura tradicional", en *La cultura del agua en Lanzarote*. Consejería de Obras Públicas y Transportes del Gobierno de Canarias-Cabildo de Lanzarote. Islas Canarias, pp. 269-286.

- HERNÁNDEZ GUTIÉRREZ, S. y GUERRA DE PAZ, F. (2006): *La Huella del Agua. Canarias*. Gobierno de Canarias. Consejería de Infraestructuras, Transporte y Viviendas. Dirección General de Aguas. Islas Canarias.
- HERNÁNDEZ MARTÍN, F.M. (2011): *Apuntes sobre el Patrimonio Etnográfico de Tenerife*. Asociación Cultural "Pinolere. Proyecto Cultural". La Orotava. Tenerife. «Cap. IV. El Patrimonio Hidráulico. Arquitecturas del Agua», pp. 72-121».
- HERNÁNDEZ PADRÓN, A. de J. y JIMÉNEZ MEDINA, A. M. (2001): "Fuentes públicas de Arucas. Gran Canaria", en *El Pajar. Cuadernos de Etnografía Canaria*, nº 9, pp. 94-100. La Orotava. Santa Cruz de Tenerife.
- HERNÁNDEZ, M^a V. y HERNÁNDEZ, A. (1990). "El calabazo", en VV.AA. *Juegos Deportivos Tradicionales* (pp. 197-219). Centro de la Cultura Popular Canaria. Santa Cruz de Tenerife.
- HERNÁNDEZ PÉREZ, M^a.V. (2010): *El riego del Calabazo* (I y II). Conferencia de ingreso en la Academia Canaria de La Lengua, publicado en la revista digital:
<http://www.bienmesabe.org/noticia/2010/Abril/riego-al-calabazo-tramas-para-su-pervivencia-i>
 (c. 11-IX-2011).
- HIDALGO SÁNCHEZ, M. (1998): "El trabajo en los pozos. Oficios tradicionales, presente y futuro". *II Jornadas de Etnografía*. 15 de marzo de 1998. Vega de Mateo. <http://www.bienmesabe.org/noticia.php?id=13611&t=1157349600&s=0>
- ÍDEM (2002): "Las minas de agua en Canarias" en *Antología sobre pequeño riego. Volumen III. Sistemas de riego no convencionales*. Edic. Jacinta Palerm Viqueira, Colegio Postgraduados México.
- IES ARUCAS DOMINGO RIVERO (2009): "Una ruta por el agua de Arucas. *Las Cantoneras*", *Rev. N° 284 de Bienmesabe.org* (consulta: 15 de noviembre de 2009). <http://www.bienmesabe.org/noticia.php?id=43431>
- JIMÉNEZ MEDINA, A. M.; ZAMORA MALDONADO, J. M. y HERNÁNDEZ PADRÓN, A. de J. (2008): "De barro eres y en barro te convertirás: los estanques de barro en Arucas, Gran Canaria. Un acercamiento a la infraestructura hidráulica de finales del siglo XIX y comienzos del siglo XX", en *El Pajar. Cuaderno de Etnografía Canaria*, nº 26, pp. 80-91. La Orotava. Santa Cruz de Tenerife. LIRIA RODRÍGUEZ, J.A. (2003): *El agua en Gran Canaria*. Jóvenes Agricultores, Las Palmas de Gran Canaria.
- LAHORA ARÁN, C.; *El ecosistema agrario Lanzaroteño*. Edita Cabildo Insular de Lanzarote. M-27655-2005
- LORENZO TENA, A. (2010): *Molinos de Agua: historia de los ingenios hidráulicos harineros de La Palma*. Ediciones Idea. Santa Cruz de Tenerife.
- LORENZO PERERA, M. J. (2006): "El agua en Canarias. Un negocio doblemente subterráneo". *Rev. n° 115 de Bienmesabe.org* (consulta: 15 de noviembre de 2009). <http://www.bienmesabe.org/noticia.php?id=12519>
- MACÍAS HERNÁNDEZ, A.M. (2000): "De Jardín de las Hespérides a Islas Sedientas. Por una historia del agua en Canarias, C. 1400-1990" en *El Agua en la Historia de España*, pp. 169-271. Edit. B. López y Melgarejo M. Universidad de Alicante. Salamanca.
- MACÍAS HERNÁNDEZ, A.M. (2008): "Notas sobre la historia del agua", en *La cultura del agua en Gran Canaria*, Consejería de Obras Públicas y Transportes del Gobierno de Canarias, pp.35-54.
- MACÍAS HERNÁNDEZ, A.M. y OJEDA CABRERA, M.P. (1989) "Acerca de la revolución burguesa y su reforma agraria. La desamortización del agua", en *Anuario de Estudios Atlánticos* nº 35. Patronato de la Casa Colón-Cabildo de Gran Canaria. Las Palmas de Gran Canaria.
- MARTÍN GONZÁLEZ, M. A.; LORENZO HERNÁNDEZ, A.; FERNÁNDEZ PÉREZ, M.; MARTÍN GONZÁLEZ, M. C.; CROSSA FERNÁNDEZ, J. F.; GARCÍA MARTÍN, M^a. C.; LEGUGA DELGADO, J.A. y VALLINA ALONSO, M^a. L. (2000): *Los Orígenes de la Electricidad en La Palma. El Electrón*. Cabildo de La Palma-Caja de Canarias. Colegio de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Tenerife. La Palma. Islas Canarias.
- MARTÍN MARTÍN, V. (1991): *Agua y agricultura en Canarias: el Sur de Tenerife*. Editorial Benchomo. Colección Tasufra nº 4. Las Palmas-Santa Cruz de Tenerife.

- MARTÍN MORENO, M. (2010): "Pequeña Edad del Hielo en el Alto Teide (Tenerife, islas Canarias). Menciones históricas y morfogénesis periglaciaria" en *Eria. Revista Cuatrimestral de Geografía*, nº 83, Universidad de Oviedo, pp. 331-342.
- MARTÍN RODRÍGUEZ, E. (2008): "El hombre y el agua en las Canarias preeuropeas. La Palma como paradigma", en *La cultura del agua en La Palma*. Gobierno de Canarias. Consejería de Infraestructuras, Transporte y Viviendas. Dirección General de Aguas. Islas Canarias.
- MEDINA PÉNATE, E. (1999): *Adeyahamen. Debajo del Agua. Localización y análisis comparativo de las principales cantones de Telde*. Ayuntamiento de Telde.
- MERINO MARTÍN Pedro (2005): "La construcción en 1786 del Pozo de la Nieve en Santa Cruz de La Palma", en *Revista de Estudios Generales de la Isla de La Palma*, nº, pp. 351-372.
- MERTENS, V. (1950): *Radiestesia y Telerradiestesia*. Editorial Era Nova. Barcelona.
- MIRANDA CALDERÍN S. (2002). *La explotación de la nieve en Canarias*. Tesis doctoral (inédita). Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- MIRANDA CALDERÍN S. (2003a): "El oficio de los neveros en Gran Canaria en el siglo XVIII, en *Veguetta*, nº 7. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, pp.115-123.
- MIRANDA CALDERÍN S. (2003b) *Los pozos de nieve en Tenerife*. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- MIRANDA CALDERÍN S. (2005): *Los pozos de nieve en Gran Canaria. Estudio histórico y geográfico de la explotación de la nieve en la isla de Gran Canaria. Siglos XVII, XVIII y XIX*. Cabildo de Gran Canaria.
- MORALES MATOS, G. y SANTANA SANTANA, A. (2005): *Islas Canarias. Territorio y Sociedad*. Colección Textos Universitarios. Anroart Ediciones. Las Palmas de Gran Canaria.
- MORALES PADRÓN, F. (1978): *Canarias: Crónicas de su Conquista*. Ayuntamiento de Las Palmas-El Museo Canario. Sevilla.
- NAVARRO ARTILES, F. y NAVARRO RAMOS, A. (1982): *Aberruntos y cabañuelas en Fuerteventura*. Mancomunidad Provincial de Cabildos de Las Palmas. Las Palmas de Gran Canaria.
- NAVARRO GARCÍA, E., ALONSO DÍAZ, S. y SAN MARTÍN BACAICOA, J. (2003): «Resumen histórico farmacológico terapéutico de las aguas minerales de Firgas», en *Canarias médica y quirúrgica*, mayo-agosto 2003, pp. 50-53.
- NAVARRO GARCÍA, E. y ALONSO DÍAZ, S. (2005): «Aguas minerales de Telde a través de nuestros investigadores e historiadores», en *Guía Histórico Cultural de Telde*, pp. 55-58.
- NAVARRO GARCÍA, E. (2006): «Resumen histórico farmacológico-terapéutico de las aguas de Teror, en *La Cultura del Agua. III Jornadas de Patrimonio Cultural de Teror*. Anroart Ediciones.
- NAVARRO GARCÍA, E. y ALONSO DÍAZ, S. (2006): «Aguas minerales del Pozo de la Fuente. Santa María de Guía. Gran Canaria», en *Canarias médica y quirúrgica*, septiembre-diciembre de 2006, pp. 62-66.
- NAVARRO GARCÍA, E. (ED.), LÓPEZ GARCÍA, J.S., SANTANA RAMÍREZ, J.I., SUÁREZ ALEJANDRO, P., HERNÁNDEZ ROMERO, F., VIÑA BRITO, A. y ACOSTA PADRÓN V. (2008): *Heredamientos de Aguas de Canarias*, Eduardo Navarro García-Ayuntamiento de Arucas, Arucas.
- NAVARRO MEDEROS, J.F. y HERNÁNDEZ MARRERO, J.C. (2008): «El agua en la prehistoria. La relación de los antiguos gomeros con el agua», en *La cultura del agua en La Gomera*. Gobierno de Canarias. Consejería de Infraestructuras, Transporte y Viviendas. Dirección General de Aguas. Islas Canarias, pp. 36-39.
- ORTEGA OJEDA, G. (1997): *Léxico y fraseología de Gran Canaria*. Ediciones del Cabildo de Gran Canaria.
- ORTEGA OJEDA, G. (2006): "El reflejo de la cultura del agua en Teror", en *La Cultura del Agua. III Jornadas de Patrimonio Cultural*. Ediciones Anroart. Las Palmas de Gran Canaria.
- PAIS PAIS, F.; PELLITERO LORENO, N. y ABREU DÍAZ, C.A. (2007): *Sistemas de aprovechamiento del agua entre los Benahoritas y su pervivencia en la época histórica*. Cuadernos CICOP para la divulgación del Patrimonio Cultural y Natural, nº 12. San Cristóbal de La Laguna. Tenerife.

- PAIS PAIS, F. (2008): «Los benahoaritas y el agua: una cuestión de supervivencia», en *La cultura del agua en La Palma*. Gobierno de Canarias. Consejería de Infraestructuras, Transporte y Viviendas. Dirección General de Aguas. Islas Canarias, pp. 59-76.
- PALLARES PADILLA (2006): «Del término Dise... y otros topónimos lanzaroteños referidos al agua dulce», en *La cultura del agua en Lanzarote*. Consejería de Obras Públicas y Transportes del Gobierno de Canarias-Cabildo de Lanzarote. Islas Canarias.
- PERDOMO CERPA, M. (2006): «Firgas. El berro y sus cosecheros», en *El Pajar. Cuadernos de Etnografía Canaria*. La Orotava. Santa Cruz de Tenerife, pp. 79-81.
- PERDOMO MOLINA, A. (2000): «Los manantiales de ñames de Anaga», en *El Pajar. Cuadernos de Etnografía Canaria*. La Orotava. Santa Cruz de Tenerife.
- PERDOMO MOLINA, A. (2002): «El sistema de cultivo en gaviás en Fuerteventura (Islas Canarias, España): la gestión del agua en un espacio árido», en *Antología sobre pequeño riego. Volumen III. Sistemas de riego no convencionales*. Ed. Jacinta Palerm Viqueira, Colegio Postgraduados México.
- PERDOMO MOLINA, A. (2005): «Los nateros de Canarias: producir aunque no llueva», en *El Baleo*, nº 28, Sociedad Cooperativa del Campo La Candelaria.
- PERDOMO MOLINA, A.; y DUPUIS, I. (2004): *Los nateros: un sistema de recolección de agua adaptado a las zonas áridas y montañosas de Canarias*. Revista de Cultura Popular Canaria Tenique. Nº 6. pp. 235-252.
- PERERA BETANCORT M. A. (1999 y 2000): «La memoria del agua en Lanzarote» I y II, en *El Pajar Cuadernos de Etnografía Canaria*. Pinolere, nº 6 y nº 7. La Orotava. Santa Cruz de Tenerife.
- PERERA BETANCORT M. A. (2006): «El agua en la cultura aborigen de los majos de Lanzarote» en *La cultura del agua en Lanzarote*. Consejería de Obras Públicas y Transportes del Gobierno de Canarias-Cabildo de Lanzarote. Islas Canarias, pp. 115-144.
- PERERA BETANCORT M. A. (2006): «Historia del agua en Lanzarote» en *La cultura del agua en Lanzarote*. Consejería de Obras Públicas y Transportes del Gobierno de Canarias-Cabildo de Lanzarote. Islas Canarias, pp. 145-216.
- PERERA BETANCORT M. A. y HERNÁNDEZ GUTIÉRREZ, A. (2006): «Agua e ingeniería popular» en *La cultura del agua en Lanzarote*. Consejería de Obras Públicas y Transportes del Gobierno de Canarias-Cabildo de Lanzarote. Islas Canarias, pp. 217-268.
- PÉREZ BARRIOS, C. R. (2006): «Abastecimiento doméstico e infraestructuras hídricas en el Sur de Tenerife en el tránsito del siglo XIX al XX», en *El Pajar. Cuadernos de Etnografía Canaria*, nº 22. La Orotava. Santa Cruz de Tenerife.
- PÉREZ MARRERO, L. (1990): «El proceso de privatización del agua en Canarias», en *Anuario de Estudios Atlánticos*, nº 36.
- PÉREZ MARRERO, L. (2003): Patrimonio e Innovación en la obtención y aprovechamiento de recursos hídricos en Canarias. Ayuntamiento de Arucas.
- PÉREZ, Manuel: «Un siglo de agua, un siglo de vida». *Rev. nº 1 de Bienmesabe.org* (consulta: 15 de noviembre de 2009). <http://www.bienmesabe.org/noticia.php?id=37>
- PÉREZ VIDAL, J. (1967): «La vivienda canaria: datos para su estudio», en *Anuario de Estudios Atlánticos*, nº 13, Madrid-Las Palmas, pp. 41-113.
- PUERTA CANSECO, Juan de la (1897): *Descripción geográfica de las Islas Canarias*. p. 36 y 53 [reedición en 2004 por E. Idea, Santa Cruz de Tenerife].
- Ramón Ojeda, A. A. (2006): «Análisis geográfico-estadístico del Patrimonio Hidráulico de Teror en el contexto de Gran Canaria en *La Cultura del Agua. III Jornadas de Patrimonio Cultural de Teror*: Anroart Ediciones, pp. 23-75.
- REYES AGUILAR, A. (1989): *Estrategias hidráulicas en la isla de La Gomera*. Museo Etnográfico-Cabildo de Tenerife-Cabildo de La Gomera. Santa Cruz de Tenerife.
- RODRÍGUEZ BRITO, W. (1995): *El agua en Canarias y el siglo XXI*. Cabildo Insular de Gran Canaria. Las Palmas de Gran Canaria.

- RODRÍGUEZ CAMPOS, L. (1993): *Proyecto de investigación-acción para la elaboración de materiales curriculares sobre la cultura del agua en Tenerife*. Dirección General de Ordenación e Innovación Educativa del Gobierno de Canarias.
- RODRÍGUEZ DELGADO O., 2009. "El Barranco del Agua de Güímar, un espacio natural de gran interés botánico, turístico y etnográfico". In Beltrán Tejera, E., J. Afonso-Carrillo, A. García Gallo & O. Rodríguez Delgado (eds.): *Homenaje al Profesor D. Wilfredo Wildpret de la Torre*: 181-212. Instituto de Estudios Canarios. La Laguna (Tenerife, Islas Canarias). Monografía LXXVIII.
- RODRÍGUEZ DELGADO, O., WILDPRET DE LA TORRE, W. y RODRÍGUEZ NAVARRO, M. L. (2006). «Capítulo I. Evolución histórica de la flora y la vegetación, a través de fuentes escritas y gráficas». In: RODRÍGUEZ DELGADO, O., & R. ELENA-ROSELLÓ (eds.), *Evolución del paisaje vegetal del Parque Nacional del Teide*: 11-243. Parques Nacionales, Ministerio de Medio Ambiente.
- RODRÍGUEZ NAVARRO, M. L.; RODRÍGUEZ DELGADO, O y WILDPRET DE LA TORRE, W. (2010). «Usos tradicionales de la flora del Parque Nacional del Teide (Tenerife, islas Canarias)». *Estudios Canarios. Anuario del Instituto de Estudios Canarios*, nº LIV: 165-199.
- ROMERO MARTÍN, L. E.; RUIZ FLAÑO, P. y HERNÁNDEZ CALVENTO, L. (2003): "El espacio de bancales en el tramo inferior de la Cuenca del Guiniguada: características ecoantrópicas", en *Veguet*, nº 7, ULPGC. Las Palmas de Gran Canaria, pp. 211-227.
- SABATÉ BEL, F. (1993): Burgados, tomates, turistas y espacios protegidos. Usos tradicionales y transformaciones de un espacio litoral del sur de Tenerife..., *Servicio de Publicaciones de la Caja General de Ahorros de Canarias*. Santa Cruz de Tenerife.
- SÁNCHEZ VALERÓN, R (2011): «Aljibes de las medianías de Ingenio, patrimonio etnográfico de gran valor», en *El Pajar Cuadernos de Etnográfica Canaria. Asociación Cultural "Pinolere Proyecto Cultural"*, nº 29, agosto de 2011, pp. 217-220.
- SÁNCHEZ PERERA, S. (2008): "La arqueología del agua en la isla de El Hierro", en *La cultura del agua en El Hierro. Gobierno de Canarias. Consejería de Infraestructuras, Transporte y Viviendas. Dirección General de Aguas. Islas Canarias*. pp.41-64.
- SANTAMARTA CEREZAL, J.C (2009): La minería del agua en el archipiélago canario. Sociedad Española para la Defensa del Patrimonio Geológico y Minero. *De Re Metallica*, 12, 1-8. Madrid.
- SANTANA, F. (1992) Castellán Aquae (Atarjeas, cantoneras). IV Feria Iberoamericana de Artesanía. Cabildo de Gran Canaria.
- SANTANA RAMÍREZ, J. I. (2006): "La fuente de Telde: recuperación de un patrimonio hidráulico", en *El Pajar. Cuadernos de Etnografía Canaria. La Orotava. Santa Cruz de Tenerife*.
- SANTANA RAMÍREZ, J. I. (2007): "La Fuente Pública de Telde, efímera memoria del agua", en *Guía Histórico Cultural de Telde*, pp. 77-90, Telde.
- SOLER LICERAS, C. (2003): "La larga búsqueda de la Fuente Santa Nullus, fons non sace", en *Revista de Obras Públicas*, julio Agosto, 2003, nº 3435. Idem en http://www.ciccp.es/biblio_digital/Icitema_III/congreso/pdf/040106.pdf (consulta: 4 de noviembre de 2009).
- SOLER LICERAS, C. (2007): *La historia de la Fuente Santa*. Publicaciones Turquesa, Consejería de Infraestructura del Ayuntamiento de Fuencaliente, La Palma.
- SOLER LICERAS, C. (2008): *El pozo de Los Padrones*, en *La cultura del agua en El Hierro. Gobierno de Canarias. Consejería de Infraestructuras, Transporte y Viviendas. Dirección General de Aguas. Islas Canarias*. pp. 121-138.
- SPA-15 (1975): Estudio científico de los recursos de agua en las Islas Canarias.
- SOSA DÍAZ J. A y PALERM SALAZAR J. M (1985-1986): Periferia, nº 4-5. Colegio de Arquitectos de Andalucía Occidental. Sevilla, pp. 69-90.
- SOSA, fray José de (1994): Topografía de la isla afortunada Gran Canaria ... *Cabildo de Gran Canaria*.
- STONE, O. M. (1995). *Tenerife y sus seis satélites. Tomo I y II. Cabildo de Gran Canaria. Las Palmas de Gran Canaria*
- SUÁREZ GRIMÓN, V. (2007): *Las Bajadas de la imagen de Nuestra Señora del Pino a Las Palmas (1607-1815)*, Anroart Ediciones, S. L., Las Palmas de Gran Canaria, 540 p.

- SUÁREZ GRIMÓN, V. y TRUJILLO YÁNEZ, G. (2006): *La Cultura del Agua. III Jornadas de Patrimonio Cultural de Teror*. Anroart Ediciones. Las Palmas de Gran Canaria-Madrid.
- SUÁREZ MORENO, F. (1994): *Ingenierías históricas de La Aldea*. Cabildo de Gran Canaria. Las Palmas de Gran Canaria.
- SUÁREZ MORENO, F. (2001): "La Noria de Jinámar: singular ingeniería hidráulica del siglo XIX...", en *Revista Histórico Cultural de Telde*, Telde, pp. 54-66.
- SUÁREZ MORENO, F. (2001): "La piedra, la cal y otros materiales en la ingeniería hidráulica canaria", en *El Pajar. Cuadernos de Etnografía Canaria*, La Orotava, pp. 84-93. Santa Cruz de Tenerife
- SUÁREZ MORENO, F. (2002): "Las minas de agua en Canarias", en *Antología sobre pequeño riego. Volumen III. Sistemas de riego no convencionales*. Ed. Jacinta Palerm Viqueira, Colegio Post-graduados México.
- SUÁREZ MORENO, F. (2003): "Artilugios, maquinarias y trabajos en los pozos de Telde", en *Revista Histórico Cultural de Telde*, Telde.
- SUÁREZ MORENO, F. (2003): *Estrategias y arquitecturas del agua en Gran Canaria (siglos XV-XX)*, 51º Congreso Internacional de Americanistas, 14-18 de julio de 2003. Santiago de Chile, Chile.
- SUÁREZ MORENO, F. (2005): "Estrategias y arquitecturas del agua en Gran Canaria", en *Crónicas de Canarias*. Junta de Cronistas de Canarias. Las Palmas de Gran Canaria.
- SUÁREZ MORENO, F. (2006): "La cultura de los pozos en Canarias", en *El Pajar. Cuadernos de Etnografía Canaria*, nº 22, La Orotava. Santa Cruz de Tenerife.
- SUÁREZ MORENO, F. y SUÁREZ PÉREZ, A. (2005): *Guía del Patrimonio Etnográfico de Gran Canaria*. Cabildo de Gran Canaria. Las Palmas de Gran Canaria.
- SUÁREZ MORENO, F. (2007): "El Patrimonio Hidráulico en Canarias", en *Arquitecturas, Ingenierías y Culturas del Agua*, INCUNA, Asociación de Arqueología Industrial. Colección "Los ojos de la memoria", Gijón. Asturias, pp. 173-192.
- TEJERA GASPAS, A. y AZNAR VALLEJO, E. (2004): *San Marcial de Rubicón*. Artemisa Ediciones. Pp. 51-67.
- TEIXIDOR CADENAS, C. (2010): "El agua del Pozo de Sabinosa, en El Hierro", en *revista Rincones del Atlántico*, número doble 6 y 7, 2010, pp. 226-239.
- TORRIANI L. (EDIC. 1978): *Descripción e historia del reino de las Islas Canarias, antes Afortunadas con el parecer de sus fortificaciones*. Goya Ediciones. Santa Cruz de Tenerife.
- TORRES CABRERA, J. (2006): *La cultura del agua en Lanzarote*. Consejería de Obras Públicas y Transportes del Gobierno de Canarias-Cabildo de Lanzarote. Islas Canarias.
- VIERA Y CLAVIJO, J. (1982): *Diccionario de historia natural de las Islas Canarias*. Madrid. Mancomunidad de Cabildos de Las Palmas.
- VITRUBIO, M.L. (Edic. 1997): *Los Diez Libros de Arquitectura*. Editorial Iberia, Barcelona.
- VVAA (2006): *La cultura del agua en Lanzarote*. Gobierno de Canarias. Consejería de Infraestructuras, Transporte y Viviendas. Dirección General de Aguas-Cabildo de Lanzarote. Islas Canarias.
- VVAA (2006): *Agua del Cielo. Documentos para la Historia de Canarias*. Gobierno de Canarias. Dirección General del Libro, Archivos y Bibliotecas. Archivo Histórico Provincial de Santa Cruz de Tenerife. San Cristóbal de La Laguna.
- VVAA (2007): *La cultura del agua en La Palma*. Gobierno de Canarias. Consejería de Infraestructuras, Transporte y Viviendas. Dirección General de Aguas. Islas Canarias.
- VVAA (2008): *La cultura del agua en Gran Canaria*. Gobierno de Canarias. Consejería de Infraestructuras, Transporte y Viviendas. Dirección General de Aguas. Islas Canarias.
- VVAA (2008): *La cultura del agua en La Gomera*. Gobierno de Canarias. Consejería de Infraestructuras, Transporte y Viviendas. Dirección General de Aguas. Islas Canarias.
- VVAA (2008): *La cultura del agua en El Hierro*. Gobierno de Canarias. Consejería de Infraestructuras, Transporte y Viviendas. Dirección General de Aguas. Islas Canarias.

Arquitectura hidráulica doméstica

Francisco Suárez Moreno

Amanhuy Suarez Pérez

Juan Carlos Santamarta Cerezal

1. Introducción

Las arquitecturas hidráulicas domésticas canarias conforman una serie de bienes patrimoniales que, en otro tiempo, estuvieron estrechamente relacionados con el agua y con el quehacer diario de las gentes en donde, muchas veces, se centralizaba la relación comunitaria y el noticiero popular y ante todo era una necesidad vital como lo es el agua para beber y para toda la actividad doméstica.

Por un lado, nuestras fuentes, pilares, lavaderos, piletas... fueron punto de encuentro sociocomunitario y la destiladera y su fresco rincón de cada vivienda, como la nevera hoy, constituía el mueble más concurrido de la casa; todo lo que queda de estos bienes muebles e inmuebles constituyen la memoria de cada lugar, huella antrópica necesaria también de protección y, por tanto, elemento fundamental del Patrimonio Hidráulico canario.

2. Eres y fuentes sagradas

En otros lugares de Canarias se hacían pocetas en barrancos o en zonas de coluviones o materiales volcánicos no compactos, siguiendo la costumbre ancestral aborigen de las *eres*, que se mantuvo hasta en la misma denominación para captar tanto

agua de abasto público como para abrevaderos. Algunas eres se excavaban cerca de algún pino frondoso que propiciaba una amplia captación del agua de la lluvia horizontal del alisio dando con ello una rica toponimia por ejemplo, en los Altos de La Orotava, la zona del “Pino del eres” que dio el actual Pinolere. O quizás aún más emblemático es la fuente pública sagrada por excelencia de Canarias la que desde la sociedad indígena en la isla de El Hierro el frondoso *Garoé*, árbol santo, que atrapaba con sus hojas el agua de la lluvia horizontal de las brumas de los vientos alisios dando de beber a toda la isla desde la época aborígen hasta 1697 en que lo derrumbó un huracán (Hernández G. 1998) y que ha vuelto a rehabilitarse con una nueva plantación y fuente.

Muchas fuentes canarias tuvieron cierto halo mágico religioso como la del *Garoé*, algunas relacionadas con la aparición de fenómenos paranaturales (brujas) como la *Fuente del Caserón*, en Valleseco. O, bien por su propiedades curativas, otras adquirieron el carácter sublime de la santidad por lo que en varias islas encontramos nombres indicativos unos que han llegado hasta la actualidad como, por ejemplo, la Fuente Santa de Fuencaliente (La Palma) otros se han borrado de la memoria por haberse secado como la Fuente Santa del Puerto de las Nieves de Agaete (Gran Canaria).

3. Fuentes públicas, pilares y chorros

Las fuentes públicas las encontramos en todos los pueblos de Canarias aunque en menor profusión en las islas secas (Lanzarote y Fuerteventura); unas apenas tienen estructura arquitectónica como es el caso de los simples manantiales que se protegían simplemente con un pequeño muro de piedra bien seca bien entrelazadas con argamasa de cal y arena, otras conllevaban obra de fábrica algunas de valor arquitectónico como el de pilares y chorros públicos. A veces el agua de abasto se conducía de sus fuentes —algunas de las cuales lo eran de minas y galerías de agua— bien por una *tajea* (*atarjea*), bien por una tubería de barro cocido (*atanores*) o más tarde de cemento o bien por canales y *esteos* de madera, hacia un punto donde en forma de pilar (de modelos arquitectónicos diferentes) o en simples surtidores conocimos como *chorros*, donde era servida a la población.

En las poblaciones principales destacan los mencionados *pilares* y *chorros*, que algunos son auténticas obras de arte sobre todo los levantados con piedra noble labrada, que encontramos en las principales ciudades. En Gran Canaria, con gran tradición de canteros y labrantes como los de Arucas, se construyeron muchas de

estas obras hidráulicas domésticas para esta ciudad y otras como Telde y Las Palmas... parte de las cuales están considerados como bienes patrimoniales protegidos en los catálogos municipales y sobre los cuales se han realizado estudios recientes (Hernández P. y Jiménez M., 2001) (Santana R. 2006 y 2007). Igualmente, en Tenerife destacan pilares de gran valor histórico y arquitectónico en Santa Cruz, La Laguna y pueblos del Sur, con la particularidad de que por solemnidades religiosas se adornan con flores, ramas y productos de la tierra, lo que aún se rememora en algunos lugares, dándole así el cariz mágico religioso que siempre tuvieron muchas fuentes en pretéritos tiempos, en muchas sociedades tradicionales.



Figura 21.1; El Chorro, fuente-pilar de abasto público, enramado con elementos vegetales, frutas y confituras de pan según costumbre tradicional por la víspera de San Juan. La Orotava. Tenerife (Rafael Gómez León, 2000).

4. Lavaderos

Otro modelo arquitectónico hidráulico anexo a las fuentes y chorros públicos así como a cursos de agua como barrancos, canales y acequias de heredades eran los *lavaderos*, unos públicos, otros privados e incluso de heredades utilizados por la población en general. Al principio eran simples lajas de piedras que se adosaban de forma inclinada en acequias, piletas anexas a estanques y cursos de agua naturales

para restregar y lavar la ropa. Luego, los ayuntamientos y heredades afrontaron la construcción de lavaderos con cantería. Así tanto a la salida del agua de las fuentes como en acequias se ensanchaban espacios con obras de fábrica para colocar varias unidades de lavaderos, casi siempre de uso público y que constituían, como las fuentes, un centro de relaciones sociocomunitarias.

En torno a los *lavaderos* se generó una profesión femenina, las *lavanderas*, que lavaban la ropa a las clases más pudientes. En tiempos recientes en muchos pueblos se han escenificado, dentro de proyectos culturales, este menester desaparecido.

El lavado tradicional era largo y complejo. Se realizaba por “tandas” que dependían del color, tipo de tejido, suciedad de las ropas y esmero de las lavanderas: remojar, enjabonar, salpicar, primer tendido, segunda mano de lavado, retorcido, etc. (Suárez M. Suárez P., 2005). Además, hubo que regular esta actividad, tanto las ordenanzas municipales como las normas de las heredades, puesto que muchos lavaderos estaban ubicados en la línea de las acequias kilométricas y contaminaban las aguas que discurrían a los niveles inferiores. Por ejemplo, en el siglo XVIII, en La Orotava, se fijó la diez de la noche como tiempo máximo del lavado, con multas a las infractoras; o, a principios del siglo XX, la heredad del Palmital-Guía cuyas aguas llegaban desde la medianías hasta la costa noroeste de Gran Canaria tenía prohibido a las lavanderas lavar entre las cuatro de la tarde y las ocho de la mañana siguiente, entre otras muchas más ordenanzas públicas y disposiciones de heredades.

Las comarcas insulares con mayor número de lavaderos son las ubicadas a barlovento como la del Norte de Tenerife, desde Icod a La Orotava o la misma vertiente del valle de Güímar o el Norte de Gran Canaria entre Guía y Arucas. En varios de estos municipios se han rehabilitado lavaderos con fondos europeos, como bienes patrimoniales etnográficos de gran valor, como es el caso de Valleseco (Gran Canaria), pionero en esta protección. En Gran Canaria isla se han inventariado hasta ahora, en las correspondientes cartas etnográficas municipales, un total de 241 lavaderos aunque realmente la cifra real fue muy superior pues hubo muchos lavaderos de propiedad privada adosados a estanques y acequias. Las fototecas públicas canarias y fondos particulares conservan muchas estampas históricas de la actividad en los lavaderos, entre finales del siglo XIX y mediados del XX.



Figura 21.2; Lavaderos públicos en Güímar (Tenerife) entre finales del siglo XIX y principios del XX (FEDAC).

5. Piletas y dornajos

Estamos ante unas sencillas construcciones domésticas hidráulicas adosadas a diversos puntos hidráulicos como, minas de agua, fuentes, estanques, acequias... Por regla general son pequeños recipientes de obra de fábrica de mampostería ordinaria (piedra y argamasa de cal, arena y ripios) o de madera con función de abrevadero. Reciben indistintamente, según zonas y época histórica, los nombres de *piletas* y *dornajos*. Seguramente esta tradición arranca de las primeras estrategias hidráulicas indígenas canarias para captar aguas en zonas rocosas y que ha dado la variante toponímica de *piletas*. Y nuestra geografía aparece dibujada con muchos elementos toponímicos como *Degollada de Piletas*, *Las Piletas*... Y es que la sociedad aborigen empleó un sistema de piletas de montañas de varias unidades en distintos planos unidos por una red de canales, algunos de cuyos conjuntos aparecen imbricados en estaciones arqueológicas relacionadas con cultos mágicos-religiosos. Pero sin descartar esta relación de algunas piletas o cazoletas de montaña con cultos a las divinidades parece muy probable que muchas de estas piletas lo fueran simples estrategias de captación de aguas manantes y pluviales para el ganado y necesidades de la población (González N, 2008) (Navarro M y Hernández M, 2008), como también en algunas islas, caso de La Palma, en fuentes y piletas de montaña aparecen manifestaciones rupestres indígenas (Martín R, 2008).

Una variante del nombre de piletas es el *dornajo* que, según el Diccionario de la Real Academia, es un «cuenco redondo con diversos usos, como dar de comer a los animales, lavar, etc.» Pero en determinadas zonas de Canarias como Tenerife y La Palma se vincula a piletas de agua, se menciona en los documentos más antiguos de sus ordenanzas municipales y ha generado una rica toponimia, que también se aplica en Lanzarote a las piletas abrevaderos de los aljibes con la variante de *tornajo*. En el norte de Tenerife se encuentran dornajos en huecos de pinos antiguos, seguramente los hubo contruidos con tablones de pinos, pero los más abundantes son los de obra de fábrica casi siempre adosada a la roca, justo mismo al lado de una fuente, chorros y pilares (Hernández M, 2011). En La Palma también aparecen y algunos vinculados a los anexos de los aljibes (Pais *et al.* 2007).

En general las piletas de obra de fábrica las encontramos en todas las islas asociadas al conjunto de pozos, pequeños estanques, aljibes, lavaderos... e incluso algunas son de piedra vaciada con pico y escoplo y en algunos casos ubicada debajo de una destiladera o pila a fin de lograr agua fresca y destilada, que encontramos en algunas casas solariegas de Lanzarote, para los animales de carga.



Figura 21.3; Destiladera-pila (parte superior) cuya agua destilada cae en una pileta-abrevadero. Casa de Espínola. Teguise. Lanzarote.

6. Destiladera o pila

La sociedad tradicional se valió de una antigua estrategia de filtro doméstico del agua para beber a través una pequeña pila de piedra encajada en un armario de madera o en una obra de fábrica, ubicada en el patio de la casa que además servía como hueco fresco para conservar los alimentos en tiempo de calores. Su uso debió llegar a Canarias bien desde la influencia, tras la Conquista, de los elementos culturales del Al Ándalus o bien directamente desde el área africana bereber con el trasiego de la esclavitud originaria de allí. El etnógrafo Pérez Vidal asegura que proviene del *mucharabyeh*, hueco de las paredes de las casas árabes destinado a colocar vasijas de barro poroso llenas de agua para mantenerlas frescas. Y perdió su funcionalidad en los años del Cambio Social, después de los años setenta, con la generalización de frigoríficos, filtros artificiales y envases de aguas minerales.

La constitución geomorfológica ofreció un singular material de canteras para labrar estas pilas-filtros de agua. Se labraban a partir tanto de cantos extraídos de mantos de arenas cementadas marinas con materiales orgánicos sedimentarios (areniscas) caso de la barra de la famosa playa de Las Canteras o los depósitos eólicos de otras areniscas de color crema de Jinámar, también con cierto componente organógeno. Esta industria extractiva generó un activo comercio con el producto de “piedra de destilar” exportado a Cuba, Venezuela y otros lugares de América, donde se asentaban colonias isleñas, en los siglos XVIII y XIX, que transfirieron esta costumbre al Nuevo Mundo (Pérez V, 1967) (Hernández G, 2001).

El conjunto donde va la pila filtrante del agua se denomina *pila* (islas orientales) o *destiladera* (islas occidentales). Es un conjunto que puede estar hecho de obra de fábrica o de madera en tres modelos según Pérez Vidal: «una, la original en un vano de la pared; otra, volada en el antepecho de un comedor; la tercera, de mueble completamente exento». Consta de tres partes: una superior donde se halla la piedra de destilar de textura porosa, semiesférica y hueca, cargada de humedad (donde crecen culantrillos u otras plantas sobre todo helechos) para almacenar el agua bruta y destilarla; la del medio donde cae el agua destilada al *bernegal* o *talla* y la *fresquera*, parte inferior o base donde se guardan frescos algunos alimentos. Este un elemento principal de la vivienda tradicional canaria, lo encontramos en los más variados diseños donde destaca tanto su ubicación en huecos de las viviendas como en muebles de madera tallada, unos cerrados y otros abiertos (Henríquez Sánchez, 1997 y Valle Quesada, 2005).

PILAS O DESTILADERAS



1 y 4. En hueco de obra de fábrica, entre habitación y patio.

2 y 3. En mueble de madera cerrado y abierto.



5. Detalle de una pila de destilar, fabricada con material de arenisca cementada.



Figura 21.4; Fotomontaje sobre las pilas y las destiladeras en Canarias. (A. Suárez, 2011)

Bibliografía consultada y referencias

- CABILDO DE GRAN CANARIA-FEDAC: Carta Etnográfica de Gran Canaria. <cartaetnografica@fedac.org>
- GONZÁLEZ NAVARRO, J. (2008): «El patrimonio hidráulico en la prehistoria de Gran Canaria», en *La cultura del agua en Gran Canaria*, Consejería de Obras Públicas y Transportes del Gobierno de Canarias. Las Palmas de Gran Canaria, pp.25-34.
- HENRÍQUEZ SÁNCHEZ, M^a. T. (1997): «Destiladera», en *Gran Enciclopedia Canaria*. Tomo V. Ediciones Canarias. Santa Cruz de Tenerife, p. 1278.
- HERNÁNDEZ GONZÁLEZ, M. (2001): «Labores canarias de piedra en América (las destiladeras y las acequias)», en *El Pajar. Cuadernos de Etnografía Canaria*, nº 9, pp. 134-137. La Orotava. Santa Cruz de Tenerife.
- HERNÁNDEZ GONZÁLEZ, M. (2006): «Manifestaciones religiosas de la acción del agua en la sociedad canaria del Antiguo Régimen», en *La Cultura del Agua*, Anroart Ediciones, Las Palmas de Gran Canaria, pp. 190-249.
- HERNÁNDEZ GUTIÉRREZ, S. (1998): *Iconografía del Árbol del Agua*. Santa Cruz de Tenerife.
- HERNÁNDEZ GUTIÉRREZ, S. (2006): «Agua y arquitectura tradicional», en *La cultura del agua en Lanzarote*. Consejería de Obras Públicas y Transportes del Gobierno de Canarias-Cabildo de Lanzarote. Islas Canarias, pp. 269-286.
- HERNÁNDEZ MARTÍN, F.M. (2011): *Apuntes sobre el Patrimonio Etnográfico de Tenerife*. Asociación Cultural “Pinolere. Proyecto Cultural”. La Orotava. Tenerife. «Cap. IV. El Patrimonio Hidráulico. Arquitecturas del Agua», pp. 72-121».
- HERNÁNDEZ PADRÓN, A. de J. y JIMÉNEZ MEDINA, A. M. (2001): «Fuentes públicas de Arucas. Gran Canaria», en *El Pajar. Cuadernos de Etnografía Canaria*, nº 9, pp. 94-100. La Orotava. Santa Cruz de Tenerife.
- PAIS PAIS, F.; PELLITERO LORENO, N. y ABREU DÍAZ, C.A. (2007): *Sistemas de aprovechamiento del agua entre los Benahoritas y su pervivencia en la época histórica*. Cuadernos CICOP para la divulgación del Patrimonio Cultural y Natural, nº 12. San Cristóbal de La Laguna. Tenerife.
- PÉREZ BARRIOS, C. R. (2006): «Abastecimiento doméstico e infraestructuras hídricas en el Sur de Tenerife en el tránsito del siglo XIX al XX», en *El Pajar. Cuadernos de Etnografía Canaria*, nº 22. La Orotava. Santa Cruz de Tenerife.
- PÉREZ VIDAL, J. (1967): «La vivienda canaria: datos para su estudio», en *Anuario de Estudios Atlánticos*, nº 13, Madrid-Las Palmas, pp. 41-113.
- SANTANA RAMÍREZ, J. I. (2006): «La fuente de Telde: recuperación de un patrimonio hidráulico», en *El Pajar. Cuadernos de Etnografía Canaria*. La Orotava. Santa Cruz de Tenerife.
- SANTANA RAMÍREZ, J. I. (2007): «La Fuente Pública de Telde, efímera memoria del agua», en *Guía Histórico Cultural de Telde*, pp. 77-90, Telde.
- SUÁREZ MORENO, F. y SUÁREZ PÉREZ, A. (2005): *Guía del Patrimonio Etnográfico de Gran Canaria*. Cabildo de Gran Canaria. Las Palmas de Gran Canaria.
- SUÁREZ MORENO, F (2007): «El Patrimonio Hidráulico en Canarias», en *Arquitecturas, Ingenierías y Culturas del Agua*, INCUNA, Asociación de Arqueología Industrial. Colección “Los ojos de la memoria”, Gijón. Asturias, pp. 173-192.
- VALLE QUESADA, M^a. T. (2005): *El mueble tradicional en Gran Canaria*. FEDAC. Cabildo de Gran Canaria. Las Palmas de Gran Canaria.

Hidrometeorología en las Islas Canarias I. Estudio de precipitaciones

Luis Manuel Santana Pérez

1. Introducción climática de la meteorología de las islas Canarias

El clima de las islas Canarias está determinado por su situación frente a la costa del noroeste de África, por su proximidad al Trópico y por las corrientes marinas frías.

La zona de altas presiones del Atlántico Oriental está situada normalmente al noroeste de las islas Canarias y permanece estable casi todo el año. Esta zona de altas presiones denominada zona de las Azores, cambia su posición durante el año, pero se encuentra casi siempre sobre la línea Azores – Madeira – Canarias. En la región de Canarias predominan los vientos alisios de componente noreste a causa del influjo de la zona de altas presiones de las Azores.

Debido a las variaciones de la intensidad y de la posición de las altas presiones de las Azores, se producen irrupciones de aire marítimo polar o de aire tropical húmedo. Las irrupciones de aire frío tienen lugar cuando se produce la rotura del frente polar, después del paso de las depresiones. Cuando las borrascas se han desarrollado siguiendo trayectorias meridionales, las irrupciones de aire frío llega a las islas Canarias.

Las irrupciones de aire frío provocan la destrucción del gradiente térmico vertical estable que produce las inversiones térmicas que acompañan al régimen de los vientos alisios. Las irrupciones de aire polar o subpolar que invaden la región cana-

ria son inestables y desencadenan una fuerte actividad convectiva que se acrecientan por el relieve. Las perturbaciones oceánicas provocan frecuentemente lluvias torrenciales.

Las borrascas ondulatorias son las únicas que llevan frentes nubosos asociados llamados borrascas extratropicales o borrascas atlánticas. Estas borrascas (hemisferio norte) se generan en la zona longitudinal próxima al círculo polar ártico 66° 33 min, zona de bajas presiones subsolares. La borrasca atlántica recién formada se desplaza en dirección sureste y en su desplazamiento hacia el sur encuentra superficies marinas más cálidas, la borrasca es más activa en su advección latitudinal, los movimientos de aire en su interior son más virulentos y más rico en vapor de agua. La borrasca que alcanza Canarias entra el factor orográfico de un modo primordial, el efecto de la ascendencia por los relieves insulares provoca lluvias muy intensas. Estas borrascas son responsables de la mayor parte de los temporales de viento y precipitación que asolan las islas.

Las precipitaciones varían en un amplio intervalo en función del grado de inestabilidad atmosférica y del contenido acuoso de la masa de aire. El factor orográfico es la causa que desencadena las precipitaciones notables, ya que las precipitaciones que acompañan a las advecciones frías marinas son poco importantes.

2. Estaciones pluviométricas de Tenerife

La red pluviométrica está constituida por diversos modelos de pluviómetros que han sido instalados en diferentes periodos siguiendo la tecnología de la época. La mayoría de los pluviómetros son homologados por los Organismos Oficiales responsables de la recogida de datos: pluviómetros de estaciones automáticas de observación 12 minutal, pluviómetro Hellmann de observación diaria, pluviómetros Hellmann totalizadores de observación mensual, y por último la demanda de información en las medianías altas y bosques de la isla ha necesitado fabricar un nuevo modelo de pluviómetro totalizador económico, gran capacidad de almacenamiento, resistente a la adversidad climáticas y antropogénica, pluviómetro totalizador ICONA.

Los pluviómetros ICONA han sido instalados en zonas desprotegidas de las islas occidentales del archipiélago canario.

El presente estudio hidrológico ha utilizado registros climáticos de los Organismos Oficiales: INM (actual AEMET), ICONA (actual Consejería de Medio Ambiente), INIA (actual ICIA, Consejería de Agricultura) y AgroCabildo (Cabildo de Tenerife).

Debemos agradecer la labor desinteresada de los observadores climáticos de cada uno de los pueblos de la isla que cada mañana después de la caída de precipitación anotan en la libreta archivo y posteriormente en la tarjeta con franquicia postal que remiten al Organismo Oficial propietario del instrumento de observación.

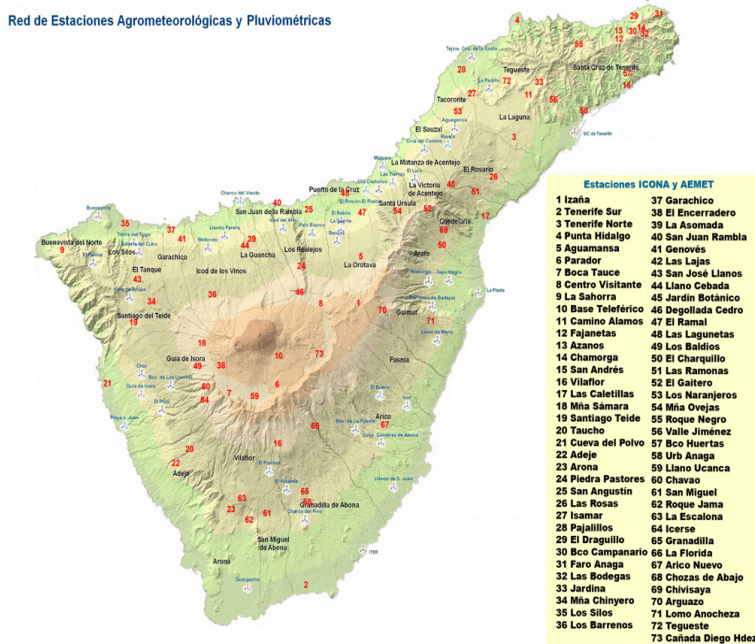


Figura 22.1; Mapa de localización de las estaciones.

Las estaciones pluviométricas están ubicadas en las Comarcas de Tenerife formando transeptos. La red pluviométrica nos permite realizar estudios hidrológicos en perfiles verticales de cada una de las vertientes de la isla.

- Valle de la Orotava.
- Comarca de Icoden.
- Comarca de Daute.

- Comarca de Isora.
- Comarca de Abona.
- Valle de Güimar.
- Parque rural de Anaga.
- Parque rural de Teno.
- Parque nacional del Teide.

3. Pluviómetros de la red climática

La precipitación atmosférica se define como las formas de agua en estado líquido o sólido que caen directamente sobre la superficie terrestre. La fuente principal de las precipitaciones son las nubes, pero no se llegan a producir hasta que las diminutas partículas que las constituyen crezcan (acrecen) y consiguen un tamaño suficientemente grande como para vencer la fuerza ascensional de las corrientes atmosféricas, momento en el cual se producen las precipitaciones por efecto de las fuerzas gravitatorias.

El pluviómetro es un instrumento que se emplea en las estaciones meteorológicas para la recogida y medición de la precipitación que cae en la superficie de la tierra en forma de lluvia, nieve, granizo. Es muy importante que sea instalado en un espacio abierto, libre de obstáculos. Los datos recibidos de las estaciones de precipitaciones son anotados en libretas climáticas. La cantidad de agua caída se expresa en milímetros de altura. El diseño básico de un pluviómetro consiste en una abertura superior de entrada de agua al recipiente, que luego es dirigida a través de un embudo hacia un colector donde se recoge y puede medirse visualmente con una regla graduada o mediante el peso del agua depositada. Una lectura automática se realiza cada 12 minutos, observación 12 minutal, y los registros acumulados diariamente se guardan en un soporte digital. Un litro caído en un metro cuadrado alcanzaría una altura de 1 milímetro.

El pluviómetro homologado más utilizado es del modelo Hellmann que consta de un vaso cilíndrico en el que el borde cortante de la anilla de latón o plástico de la parte superior, asegura una superficie de recogida con una sección de exactamente 200 cm². Un embudo profundo para que las gotas que hayan entrado no salgan al rebotar, conduce el agua a otro recipiente cilíndrico, el colector de boca estrecha en la que entra el tubo del embudo. Así, toda el agua recogida se conserva en el vaso colector protegido contra la evaporación por el estrechamiento de la boca y por el

dispositivo de dobles paredes que resulta. La medida de la precipitación recogida se realiza pasando el agua del colector a una probeta graduada. Para facilitar la medida de las décimas, la escala de la probeta se ha hecho teniendo en cuenta la superficie de recogida, y los valores medidos son los que corresponderían a los que hubiéramos recogido en un pluviómetro de un metro cuadrado de superficie de recogida de agua. Esta probeta es específica para medir la lluvia recogida en un pluviómetro de 200 cm² de sección.

Cuando un día llueve, al día siguiente por la mañana se saca la vasija que hay dentro del pluviómetro vertiendo su contenido en la probeta graduada, leyéndose la altura alcanzada en litros y décimas. Se debe tener especial cuidado en ésta operación.

Las medidas se deben hacer siempre a la misma hora, debiéndose medir cualquier tipo de precipitación, sea cual sea su origen: lluvia, nieve, granizo, niebla, rocío o escarcha. La probeta puede ser de cristal o plástico transparente, en ella aparecen diez rayas largas separadas unas de otras una distancia semejante al grosor de un dedo pulgar, cada una de las cuales representa un litro de precipitación por metro cuadrado o lo que es lo mismo 1 mm de precipitación. Las rayas pequeñas representan décimas de litro o décimas de milímetro de precipitación. En algunas probetas especialmente diseñadas, cada litro de precipitación está representado en la probeta por una distancia de dos centímetros, por lo que cada décima tiene una separación de dos milímetros en la escala que está grabada en la probeta.



Figura 22.2; Pluviómetro Hellman totalizador de montaña. (Santana LM)

La medida máxima de la probeta es de 10.0 litros, o si se prefiere 10 milímetros, por tanto, las precipitaciones que sean superiores a ésta, deberán medirse en varias veces. Por el contrario, las cantidades inferiores a 0.1 mm; es decir, cuando el agua en la probeta no llegue a la primera rayita, se dice que es inapreciable y se suele poner “ip”, es decir, precipitación inapreciable. Para leer la medida del agua en la probeta hay que mantenerla en vertical entre los dedos índice y pulgar a la altura de los ojos, haciéndose la lectura por la parte más baja del menisco.

En lugares de acceso difícil, principalmente zonas de montañas, es utilizado el pluviómetro o nevómetro totalizador Hellmann. Observadores climáticos realizan las medidas varias veces al año y su periodicidad depende de la lejanía y disponibilidad de personal. Es recomendable que los registros se hagan a principio de cada mes. Los instrumentos totalizadores de montaña recogen precipitaciones sólidas o precipitaciones abundantes caídas durante varios días. Las precipitaciones caen directamente a un recolector de gran capacidad donde es imposible el rebosamiento. El agua recolectada se mide con una probeta graduada utilizando el mismo procedimiento que en un pluviómetro Hellmann.

Pluviómetros con depósito de almacenamiento de gran capacidad e instalado en el interior de un cilindro metálico protector. La superficie de recepción de 200 cm² está situada entre 2 a 3 metros de altura y rodeada de una lámina metálica troncocónica para evitar la acción de las ráfagas de viento de gran velocidad. El pluviómetro tiene color blanco para protegerla del calentamiento de la radiación solar incidente. La ubicación óptima de pluviómetro es una zona despejada de obstáculo que permita la libre circulación del aire.

La necesidad de cuantificar las precipitaciones en la extensa zona medianías altas o montaña con topografía accidentada necesita gran número de pluviómetros para atender la diversidad climática. En el periodo 1982 a 1988, el taller del ICONA (La Laguna) fabricó un modelo novedoso, práctico y económico. La instalación de los nuevos pluviómetros cuantificaron las precipitaciones durante seis años, posteriormente, se dibujaron las isoyetas anuales correspondientes. El recipiente de material galvanizado tiene forma tronco cónica con una superficie circular de recepción de 32 cm de diámetro. El receptor está suspendido en un poste a 2.5 m de altura; las precipitaciones depositadas en su interior fluyen por medio de una manguera a un depósito graduado soterrado y protegido del exterior por una plancha metálica con su correspondiente candado. La medida de agua la realizamos con una probeta convencional de 1 litro de capacidad y la debemos multiplicar por el factor 12.4 para conocer la precipitación por metro cuadrado.

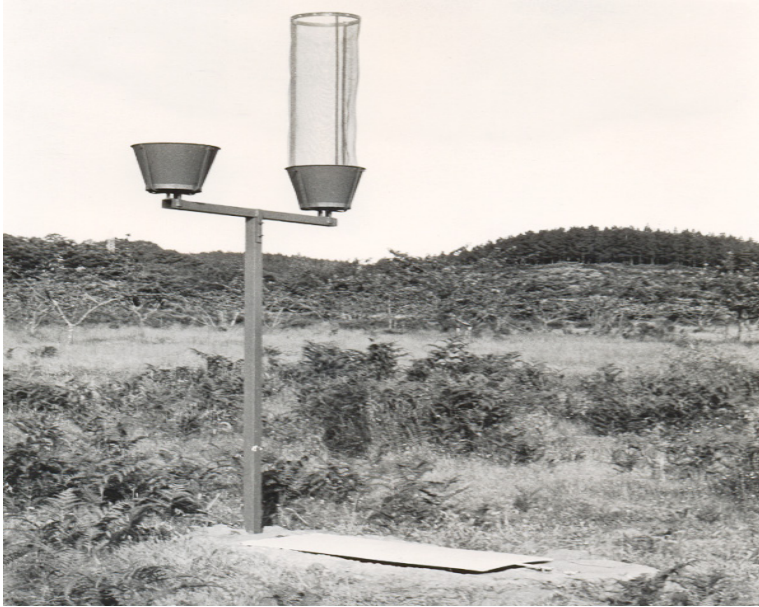


Figura 22.3; Pluviómetros totalizadores y captaniebla cilíndricos fabricados en las instalaciones del ICONA. (Santana, LM)

Los depósitos se entierran, la pérdida de agua por evaporación es insignificante. Los depósitos graduados tienen 25 litros de capacidad. El problema que presenta la instalación es debida a la acción de desaprensivos que buscan en los depósitos algún beneficio económico o el contenido acuoso para saciar la sed de los perros en época de cacería.

4. Precipitaciones medias estacionales y anuales

El periodo temporal de observaciones diarias de cada una de las estaciones pluviométricas es diferente, por tanto, el número de años que interviene en las estimaciones de las precipitaciones medias acumuladas estacionales y precipitación media acumulada anual en cada una de las estaciones pluviométricas es diferente.

Es imposible presentar homogeneidad temporal en el conjunto de precipitaciones diarias, la adquisición e instalación de los pluviómetros ha necesitado largo tiempo de ejecución. En el caso de hacer coincidir el periodo temporal de observación en

la red pluviométrica encontraríamos pocas estaciones que reúnan dichas condiciones, es decir, existiría poca coincidencia temporal entre las estaciones. También, no olvidemos los diferentes modelos de pluviómetros que constituyen la red pluviométrica, diseñados siguiendo la disponibilidad económica y tecnología de la época.

La precipitación media acumulada para un periodo temporal y lugar concreto es la estimación de la precipitación acumulada en una superficie extensa alrededor del pluviómetro. En el supuesto experimento de colocar varios pluviómetros en dicha superficie obtenemos distintos valores de las precipitaciones medias acumuladas, por tanto, la presentación gráfica de las precipitaciones medias acumuladas en diferentes periodos temporales y modelos instrumentales por medio de un mapa esquemático o mapa de isoyeta es un buen procedimiento para estimar la precipitación acumulada en cualquier lugar de la superficie insular.

Para conocer con detalle el conjunto de precipitaciones en un periodo temporal concreto, no basta con conocer las medidas de tendencia central, sino que necesitamos conocer también la desviación que presentan las precipitaciones en su población respecto de la media aritmética de dicha población, con objeto de tener una visión de los mismos más acorde con la realidad al momento de describirlos e interpretarlos para la toma de decisiones.

La desviación se define como la diferencia entre cada observación individual y la media de la población; la varianza se define como la media aritmética del cuadrado de las desviaciones respecto a la media de una población. La desviación típica se define como la raíz cuadrada de la varianza; la desviación típica es una medida (cuadrática) que informa de la media de distancias que tienen las observaciones respecto de su media aritmética, expresada en las mismas unidades.

Realizamos un estudio estadístico en múltiples poblaciones de precipitaciones acumuladas en distintos periodos temporales, y queremos comparar resultados, no podemos acudir a la desviación típica para ver la mayor o menor homogeneidad de los datos, sino a otro parámetro nuevo, llamado coeficiente de variación y que se define como el cociente entre la desviación típica y la media.

En la siguiente tabla presentamos los estadísticos de centralización y dispersión más representativos de las estaciones pluviométricas con mayores periodos temporales y supuestamente calidad de observación. Presentamos las medias aritmética de las precipitaciones acumuladas cada estación y anual, y su correspondiente coeficiente de variación.

Las precipitaciones medias estacionales y precipitación media anual con sus correspondientes coeficientes de variación:

Las estaciones pluviométricas se presentan por orden alfabético en el municipio donde está ubicada y por altitud. Afirmaciones:

- Las precipitaciones medias son superiores cuando aumentan la altitud del punto de observación.
- La precipitación media invernal no se puede afirmar que es superior a la precipitación media otoñal.
- La precipitación media primaveral es superior a la precipitación media estival.
- Las precipitaciones medias invernal y otoñal son intensas mientras que la precipitación primaveral es moderada y la precipitación estival es débil.
- La precipitación media anual en la vertiente norte es superior a la precipitación media anual en las vertientes sur y oeste.
- La vertiente noreste recibe más precipitación que la vertiente noroeste. Las medianías de la vertiente norte recogen las precipitaciones más intensas.
- La precipitación media anual en la zona central, cotas superiores a 2000 m de altitud, es similar a la precipitación media anual de las medianías sur y oeste de Tenerife.
- Los coeficientes de variación de las precipitaciones medias estacionales son superiores al coeficiente de variación de la precipitación media anual.
- En general, el coeficiente de variación de la precipitación media invernal es ligeramente superior al coeficiente de variación de la precipitación media otoñal.
- El coeficiente de variación de la precipitación media estival es notablemente superior al coeficiente de variación de la precipitación media primaveral.
- Las precipitaciones moderadas estivales son ocasionales y debidas a fenómenos meteorológicos excepcionales; las precipitaciones débiles primaverales y

estivales son a causa de la acción más o menos intensa de los vientos alisios sobre las vertientes insulares.

Las precipitaciones intensas o torrenciales tienen lugar en las estaciones invernal y otoñal a causa de las irrupciones de aire marítimo frío, depresiones atlánticas extra-tropicales y depresiones en altura. Las precipitaciones moderadas tienen lugar en las estaciones invernal, primaveral y otoñal principalmente a causa de las irrupciones de aire marítimo frío. Las precipitaciones débiles tienen lugar cualquier época del año, principalmente a causa de los pertinaces vientos alisios.

5. Distribución de las precipitaciones medias trimestrales y anuales

5.1. Mapa esquemático de isoyetas medias invernales

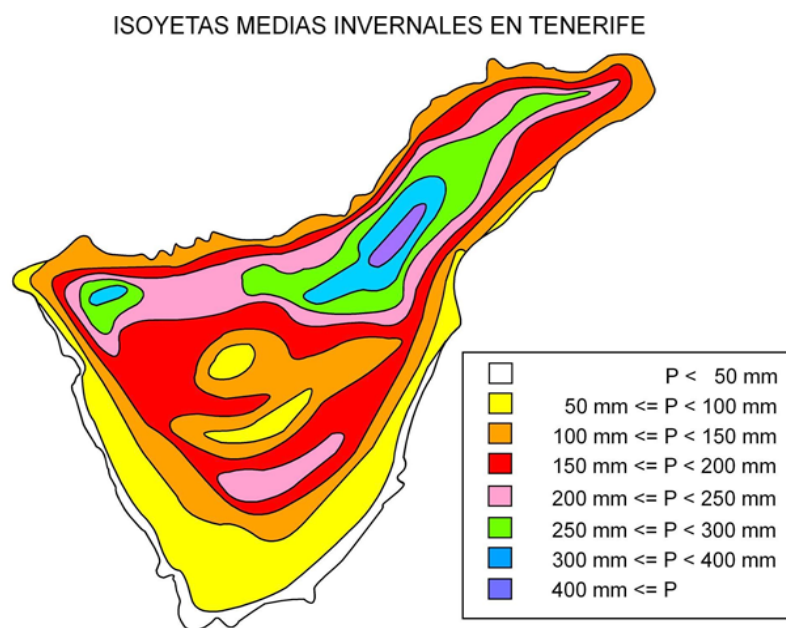


Figura 22.4; Isoyetas medias invernales en Tenerife. (Santana, LM)

La franja costera este a noroeste recibe la menor cantidad de precipitación ($P < 100 \text{ mm}$), lo contrario, la franja de medianía alta norte, cotas entre 900 m a 1500 m, recibe la mayor cantidad de precipitación ($300 \text{ mm} < P < 425 \text{ mm}$). Son notables, las

precipitaciones recogidas en la medianías baja noroeste y norte a noreste, zona de cultivo y bosques de lauráceas ($250 \text{ mm} < P < 300 \text{ mm}$). La zona boscosa de pinar, cotas superiores a 1500 m recibe precipitaciones notables ($150 \text{ mm} < P < 200 \text{ mm}$). La zona central, alta montaña, cotas superiores a 2000 m, recibe precipitaciones líquidas y sólidas ($100 \text{ mm} < P < 200 \text{ mm}$). Las precipitaciones medias invernales en Aeropuerto Reina Sofía 51 mm, Playa San Juan 50 mm, Santa Cruz de Tenerife 102 mm, Erjos 263 mm, Aguamansa 339 mm, Ravelo 323 mm, Los Rodeos 236 mm, El Rosario – Madroños 386 mm, La Victoria – Lomo 334 mm, Las Lagunetas 403 mm e Izaña 101 mm. Las precipitaciones notables recogidas en la medianía alta sur a suroeste son debidas a las frecuentes borrascas atlánticas que descargan impetuosamente su contenido acuoso en esta zona de Tenerife.

5.2. Mapa esquemático de isoyetas medias primaverales

La franja costera y medianía baja noreste a noroeste, medianía alta sur a oeste y alta montaña recibe la menor cantidad de precipitación ($P < 25 \text{ mm}$), lo contrario, la franja de medianía alta norte, bosques de lauráceas y pinares, cotas 900 m a 1400 m, recibe la mayor cantidad de precipitación ($P > 125 \text{ mm}$).

Son importantes, las precipitaciones recogidas en las medianías norte y noreste, zona de cultivos, bosque de lauráceas, cotas 600 m a 900 m y pinares, cotas 700 m a 1500 m ($100 \text{ mm} < P < 125 \text{ mm}$).

La costa noroeste a noreste y pinares, cotas 1500 m a 2100 m reciben precipitaciones notables ($25 \text{ mm} < P < 50 \text{ mm}$). Las precipitaciones medias primaverales en Aeropuerto Reina Sofía 10 mm, Santa Cruz de Tenerife 19 mm, Playa San Juan 6 mm, Erjos 87 mm, Aguamansa 119 mm, Ravelo 128 mm, Los Rodeos 83 mm, El Rosario – Madroños 120 mm, La Victoria – Lomo 83 mm, Las Lagunetas 107 mm e Izaña 39 mm.

Las cumbres y bordes de acantilados de las vertientes noroeste a noreste y sureste entre las cotas de 900 y 1200 m recibe una precipitación no contabilizada por los instrumentos convencionales, la precipitación de niebla y su cuantía es considerable en lugares de arbolado expuestos a vientos moderados a fuertes muy húmedos: crestería de los Macizos de Anaga y Teno, acantilados de Tigaiga (Los Realejos) y Anocha (Güímar).

Las laderas expuestas a vientos débiles, húmedos o muy húmedos recogen en el periodo nocturno precipitaciones no contabilizadas, la precipitación de rocío y su cuantía es importante en el interior de bosques y lugares frescos resguardados del viento; su mayor intensidad tiene lugar momentos anteriores al amanecer.

ISOYETAS MEDIAS PRIMAVERALES EN TENERIFE

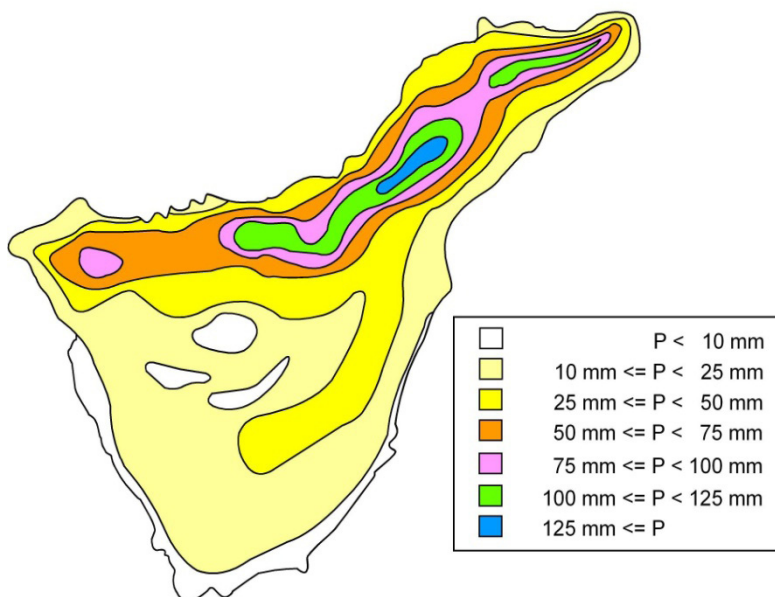


Figura 22.5; Isoyetas medias primaverales en Tenerife. (Santana, LM)

5.3. Mapa esquemático de isoyetas medias estivales

La franja costera este a norte, medianía baja este a noroeste y alta montaña, cotas superiores a 2400 m, recibe la menor cantidad de precipitación ($P < 10 \text{ mm}$), lo contrario, la franja de medianía alta norte, bosques de lauráceas, cotas 900 m a 1400 m, recibe la mayor cantidad de precipitación ($P > 40 \text{ mm}$). Son notables, las precipitaciones recogidas en las medianías norte y noreste, zona de cultivos y bosque de lauráceas, cotas 650 m a 1000 m y pinares, cotas 1000 m a 1500 m ($30 \text{ mm} < P < 40 \text{ mm}$).

Las medianías altas de las vertientes sureste a norte y la costa norte a noreste reciben precipitaciones considerables ($15 \text{ mm} < P < 25 \text{ mm}$). Las precipitaciones medias estivales en Aeropuerto Reina Sofía 5 mm, Santa Cruz de Tenerife 7 mm, Playa San Juan

6 mm, Erjos 20 mm, Aguamansa 25 mm, Ravelo 36 mm, Los Rodeos 33 mm, El Rosario - Madroños 66 mm, La Victoria - Lomo 33 mm, Las Lagunetas 47 mm e Izaña 16 mm. Las cumbres y bordes de acantilados de las vertientes noroeste a noreste y sureste entre las cotas de 900 y 1200 m recibe precipitación de niebla y su cuantía es considerable en lugares de arbolado expuestos a vientos moderados a fuertes muy húmedos: crestería de los Macizos de Anaga y Teno, acantilados de Tigaiga (Los Realejos) y Anocha (Güimar). Las laderas expuestas a vientos débiles y muy húmedos recogen en el periodo nocturno precipitación de rocío y su cuantía es notable en el interior de bosques y lugares frescos resguardados del viento.

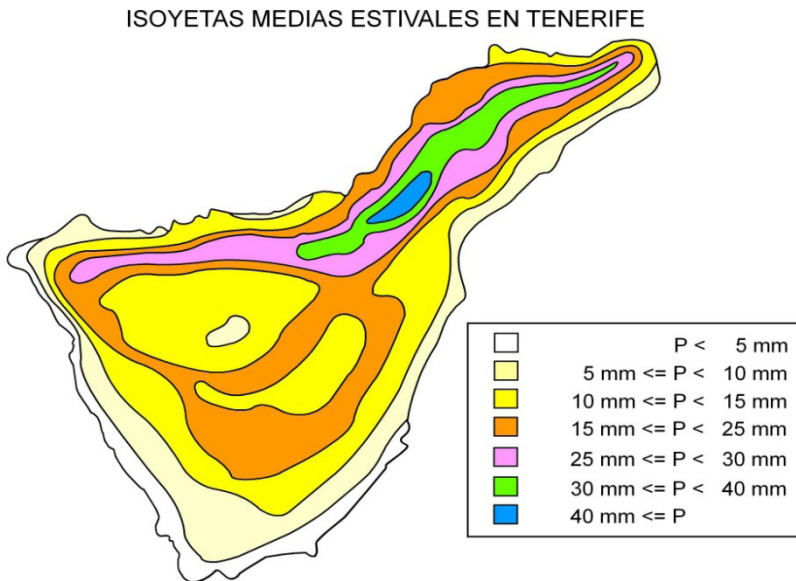


Figura 22.6; Isoyetas medias estivales en Tenerife. (Santana, LM)

5.4. Mapa esquemático de isoyetas medias otoñales

La franja costera este a noroeste recibe la menor cantidad de precipitación ($P < 100$ mm), lo contrario, las franjas de medianías noroeste y noreste, cotas 600 m a 900 m, y la franja medianía alta, cotas 900 m a 1500 m recibe la mayor cantidad de precipitación ($300 \text{ mm} < P < 400 \text{ mm}$). Son notables, las precipitaciones recogidas en las medianías noroeste a noreste, zona de cultivo y bosques de lauráceas ($250 \text{ mm} < P < 300 \text{ mm}$).

La zona boscosa de pinar, cotas superiores a 1500 m recibe precipitaciones notables ($200 \text{ mm} < P < 250 \text{ mm}$). La zona central, alta montaña, cotas superiores a 2000 m, recibe precipitaciones líquidas y sólidas ($100 \text{ mm} < P < 200 \text{ mm}$). Las precipitaciones medias otoña en Aeropuerto Reina Sofía 61 mm, Playa San Juan 80 mm, Santa Cruz de Tenerife 108 mm, Erjos 295 mm, Aguamansa 290 mm, Ravelo 282 mm, Los Rodeos 252 mm, El Rosario - Madroños 388 mm, La Victoria - Lomo 272 mm, Las Lagunetas 451 mm e Izaña 212 mm.

Las precipitaciones notables recogidas en la medianía alta sur a oeste son debidas a las frecuentes borrascas atlánticas que descargan impetuosamente su contenido acuoso en esta zona de Tenerife. En general, las precipitaciones medias otoñales para una cota concreta son superiores a las precipitaciones medias invernales.

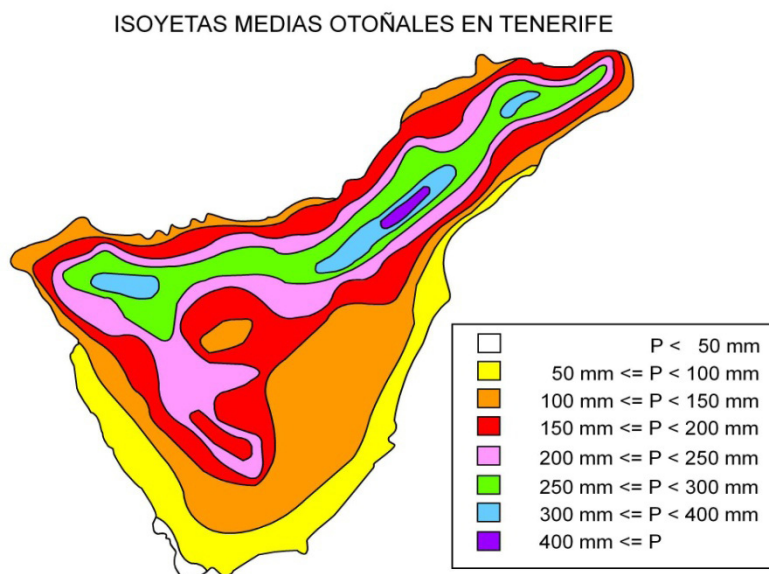


Figura 22.7; Isoyetas medias otoñales en Tenerife. (Santana, LM)

5.5. Mapa esquemático de isoyetas medias anual

La franja costera este a noroeste recibe la menor cantidad de precipitación ($P < 200 \text{ mm}$), lo contrario, la franja de medianía alta norte, cotas entre 900 m a 1500 m, recibe la mayor cantidad de precipitación ($700 \text{ mm} < P < 1000 \text{ mm}$). Son notables, las

precipitaciones caídas en las medianías noroeste y noreste ($600 \text{ mm} < P < 700 \text{ mm}$) y medianía alta sur a suroeste ($300 \text{ mm} < P < 400 \text{ mm}$). La zona boscosa de pinar, cotas superiores a 1500 m recibe precipitaciones notables ($400 \text{ mm} < P < 500 \text{ mm}$). La zona central, alta montaña, cotas superiores a 2000 m, recibe precipitaciones líquidas y sólidas ($200 \text{ mm} < P < 400 \text{ mm}$). Las precipitaciones medias anuales en Aeropuerto Reina Sofía 123 mm, Playa San Juan 80 mm, Erjos 660 mm, Santa Cruz de Tenerife 236 mm, Aguamansa 777 mm, Ravelo 770 mm, El Rosario - Madroños 960 mm, Las Lagunetas 1008 mm e Izaña 449 mm.

Las precipitaciones notables recogidas en las medianías altas sur a suroeste son debidas a las frecuentes borrascas atlánticas que descargan impetuosamente su contenido acuoso en esta zona de Tenerife. Las precipitaciones medias otoñales para una cota concreta son superiores a las precipitaciones medias invernales.

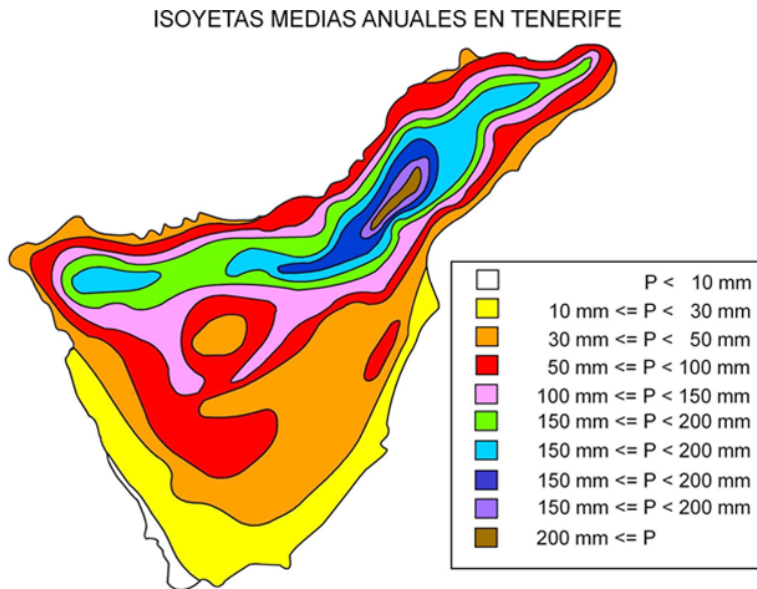


Figura 22.8; Isoyetas medias anuales en Tenerife. (Santana, LM)

6. Precipitaciones débiles en la costa y medianía. Los alisios

Las masas de aire que llegan a las costas del archipiélago canario están condicionadas por la distribución de la temperatura de la superficie del mar, estrechamente relacionada con la corriente fría de Canarias. Las masas de aire son expulsadas del

anticiclón caliente de las Azores, y en esta región forman los vientos alisios, vientos moderados que soplan principalmente en la dirección noreste.

Los vientos alisios transportan a las islas aire húmedo y fresco. A esta capa de aire húmedo superficial se le superpone otra capa seca, separadas ambas por una inversión vertical de temperatura. En esta zona, tiene lugar los fenómenos de condensación de vapor de agua, desarrollándose una amplia capa de estratocúmulos, llamada popularmente mar de nubes.

Este tipo de estratificación atmosférica es muy estable, la posibilidad de movimientos convectivos y turbulentos queda limitados por la capa seca. En la costa del continente africano, donde más frías son las aguas, se forman principalmente en verano, una auténtica barrera de aire frío que en las situaciones invasiones de aire caliente procedentes del interior del continente no puede remover, las masas de aire caliente a través de ésta, se desplazan en altura hacia el océano. En Canarias este fenómeno es una de las causas de la inversión de temperaturas sobre la superficie del mar; el nivel y espesor de la inversión de la temperatura sufre grandes variaciones durante el transcurso del día. La altura de la base de la inversión suele disminuir progresivamente a medida que aumenta el calentamiento diurno del suelo.

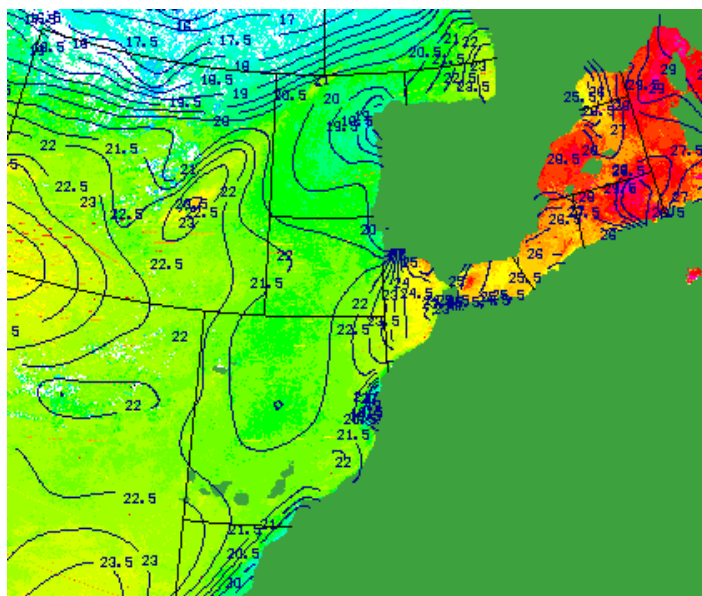


Figura 22.9; Temperatura superficie del mar el 18 de julio de 2010. Las isotermas disminuyen su valor cuando nos aproximamos a la costa sahariana. Temperaturas comprendidas entre 20 °C. (Fuente AEMET)

Las situaciones sinópticas que modifican el régimen dominante de los vientos alisios en la región canaria, sucede por la llegada de advecciones superiores de aire polar o por el paso de zonas de bajas presiones, estas situaciones rompen la estratificación estable de la atmósfera y provocan el desarrollo de grandes movimientos convectivos que cambian el carácter de buen tiempo, registrándose en la mayor parte de las islas, precipitaciones y según el origen de la situación depresionaria, pueden desencadenar abundantes lluvias en zonas del archipiélago.

7. Presión atmosférica sobre la superficie del mar

El mapa sinóptico siguiente, indica altas presiones moderadas sobre el Atlántico oriental centrada en las Azores, bajas presiones poco profundas centradas en Portugal y una zona depresionaria poco profunda centrada en la costa mauritana. En la costa de las vertientes NW a NE soplan vientos muy débiles a débiles, muy húmedos en el sector N a E; en la costa de las vertientes E a S soplan vientos moderados a muy fuertes, húmedos en la dirección NE; en la vertiente de las vertientes S a NW soplan vientos muy débiles, húmedos en el sector S a SW.

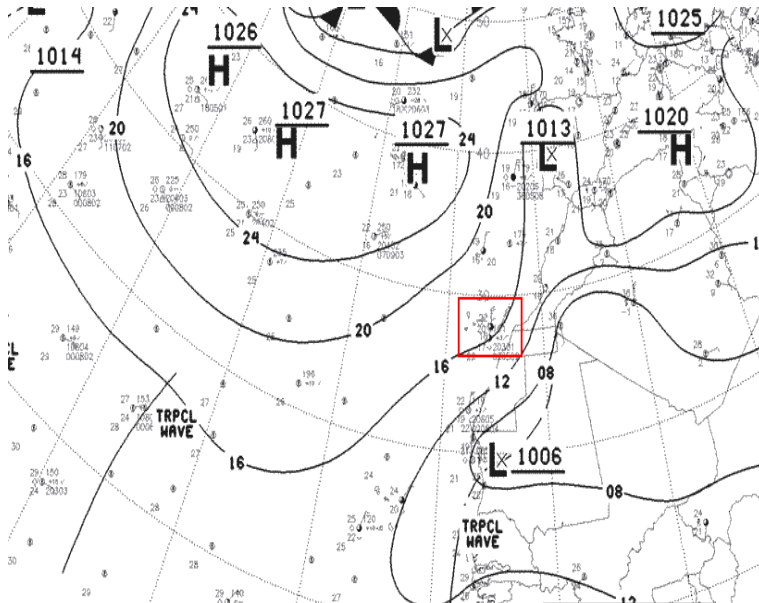


Figura 22.10; Situación meteorológica en superficie 8 de julio de 2010 a las 0 h UTC
(Fuente AEMET)

En las medianías (cotas superiores a 500 m) de las vertientes NW a NE soplan vientos débiles a moderados, semihúmedos a semisecos, en el sector en a SE; en la medianía de las vertientes E a S soplan vientos débiles a moderados, secos en el sector N a SE; en la vertiente de las vertientes S a NW soplan vientos débiles a moderados, secos a húmedos en el sector SE a SW. Lloviznas localizadas en las medianías bajas de las vertientes N a NE. Nubes y claros en las vertientes NW a NE.

El mapa sinóptico siguiente, indica altas presiones moderadas sobre el Atlántico oriental y una zona depresionaria poco profunda centrada al oeste de Mauritania. En la costa de las vertientes NW a NE soplan vientos muy débiles a débiles, húmedos en el sector N a SE; en la costa de las vertientes E a S soplan vientos moderados a muy fuertes, húmedos en el sector N a NE; en la vertiente de las vertientes S a NW soplan vientos muy débiles, húmedos en el sector S a SW.

En las medianías (cotas superiores a 600 m) de las vertientes N a NE soplan vientos débiles a moderados, húmedos a secos, en el sector en a SE; en las medianías de las vertientes E a S soplan vientos débiles, secos en el sector N a E; en la vertiente de las vertientes S a NW soplan vientos débiles a moderados, secos a semihúmedos en el sector SE a SW. Ausencia de precipitaciones. Nubes y claros en las vertientes NW a NE.

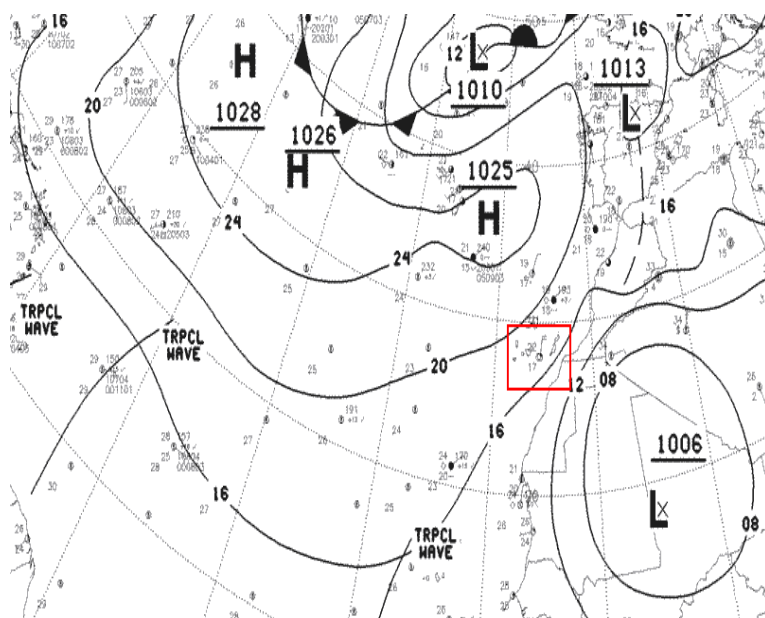


Figura 22.11; Situación meteorológica 9 de julio de 2010 a las 0 h UTC. (Fuente AEMET)

En las siguientes imágenes, el satélite indica nubes estratiformes sobre la zona oceánica al norte de Tenerife. La capa de estratocúmulos tiene pequeño espesor y en su interior no destacan los movimientos convectivos verticales.

La capa nubosa se encuentra entre 500 y 550 m de altitud, tiene poco contenido acuoso (proporción de mezcla: 11.5 g/Kg) y sigue una distribución paralela a la costa africana según la dirección suroeste a noreste, debido a los vientos húmedos que soplan en dirección noreste expulsados por el anticiclón atlántico en contacto con la superficie marina “fresca” de las aguas de Canarias.

Es notable la formación de bancos de neblinas advectivas continentales en la región de Tarfaya (Sahara occidental).

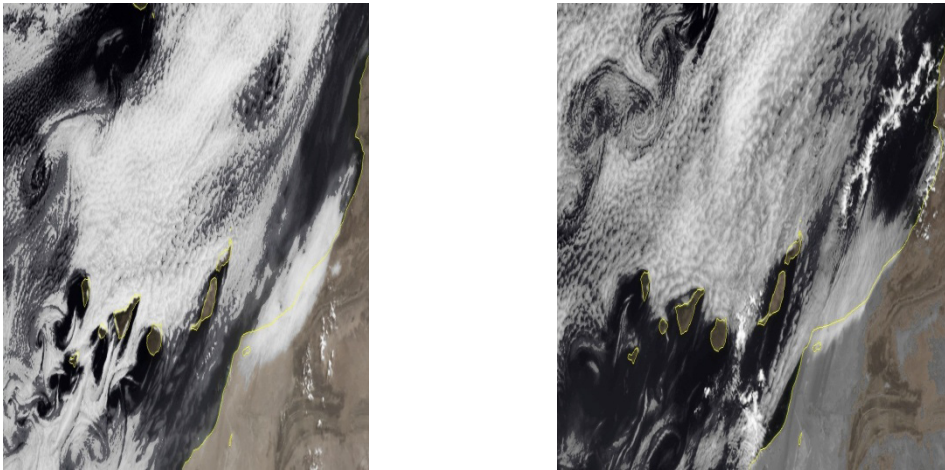


Figura 22.12; Imágenes del satélite Meteosat 9 (visible): 8 y 9 de julio las 9 y 12 h UTC.

La siguiente imagen infrarroja indica la distribución en la costa africana del mayor contenido acuoso del aire húmedo expulsado del anticiclón de las Azores y en contacto con la superficie marina de la “corriente fría de Canarias”. La masa de aire con mayor contenido acuoso está relacionada con la temperatura de la superficie marina más fría en la costa africana, por tanto, la presencia de nubes estratiformes.

La imagen visible indica la extensión de la capa de estratocúmulos asociada al movimiento de la masa de aire expulsado por el anticiclón de las Azores.

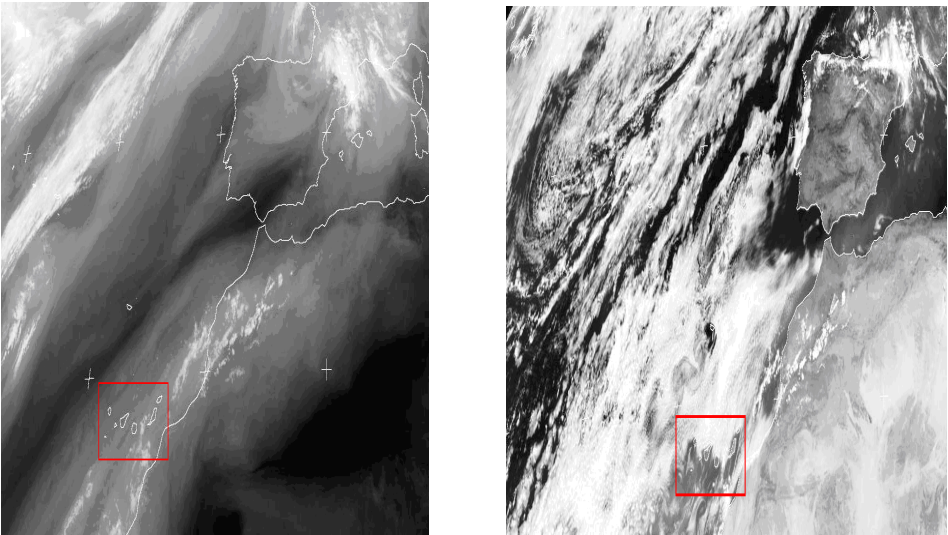
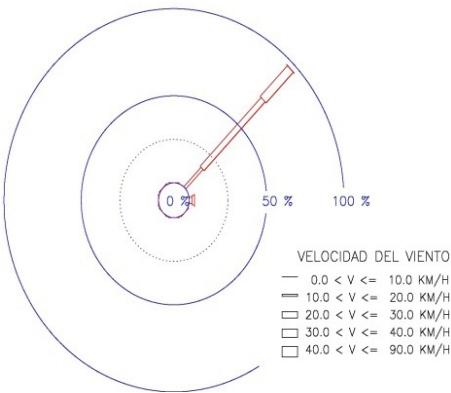


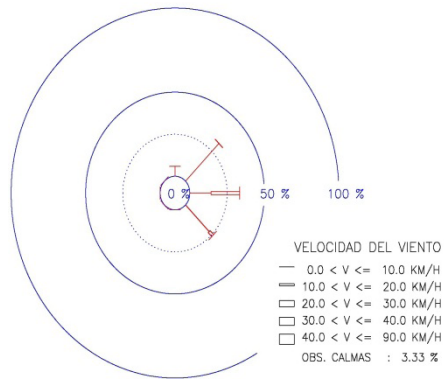
Figura 22.13; Imágenes del satélite Meteosat 9 (infrarrojo / vapor y visible): 9 de julio a las 12 h UTC

8. Rosas de velocidad del viento y humedad relativa del aire

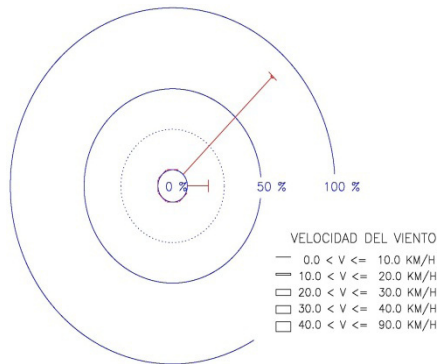
La rosa de viento es la presentación de las frecuencias relativas de las velocidades según las direcciones con que sopla el viento. La leyenda del gráfico nos muestra la relación de frecuencias (longitud del brazo) y la escala de velocidades (grosor del brazo). Se estudian tres casos de la isla; Charco del Viento, Ravelo y Llanos de San Juan.



Charco del Viento, los vientos débiles ($V \leq 10$ km/h) soplan en el sector NE a E, en la dirección E son frecuentes y en la dirección NE son dominantes; el día es caliente (21.8°C), muy húmedo (88 %), ligeramente ventoso (5.9 km/h), nuboso (12.9 MJ/m²) y ETP baja (2.7 mm).



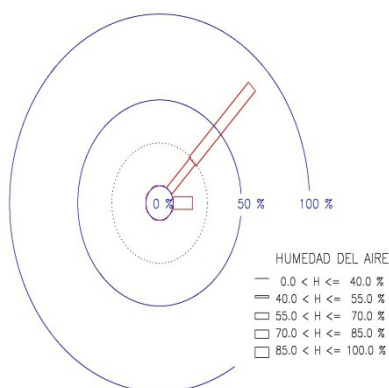
Ravelo, los vientos débiles soplan en el sector N a SE, en el sector NE a SE son frecuentes; los vientos moderados ($10 \text{ km/h} < V \leq 20 \text{ km/h}$) soplan en el sector E a SE y en la dirección E son dominantes; el día es caliente (23°C), seco (37 %), ligeramente ventoso (8.3 km/h), soleado (25.7 MJ/m²) y ETP muy alta (6.4 mm).



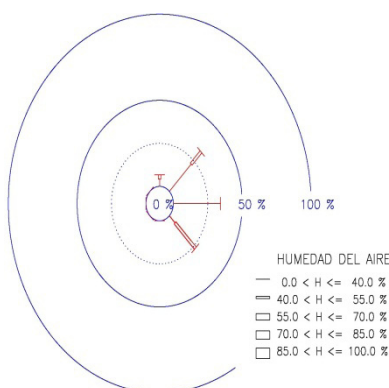
Llanos de San Juan, los vientos moderados soplan en la dirección NE y son frecuentes; los vientos fuertes soplan en el sector NE a E y en la dirección NE son dominantes; los vientos muy fuertes soplan en el sector NE a E y en la dirección NE

son frecuentes; el día es caliente (22 °C), húmedo (85 %), muy ventoso (26.3 km/h), soleado (25.6 MJ/m2) y ETP baja (3.3 mm).

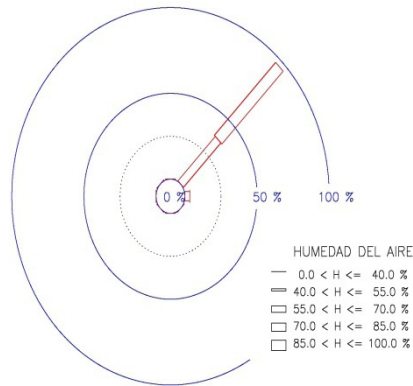
La rosa de humedad es la presentación de las frecuencias relativas de las humedades relativas del aire según las direcciones con que sopla el viento.



Charco del Viento, los vientos húmedos (70 % < H <= 85 %) soplan en la dirección NE y son frecuentes; los vientos muy húmedos (85 % < H <= 100 %) soplan en el sector NE a E, en la dirección E son frecuentes y en la dirección NE son dominantes.



Ravelo, los vientos ($H \leq 40\%$) soplan en la dirección SE y en el sector N a NE, y en las direcciones NE y SE son frecuentes; los vientos semisecos ($40\% < H \leq 55\%$) soplan en la dirección SE y en el sector N a NE, en las direcciones NE y SE son frecuentes.



Llanos de San Juan, los vientos húmedos soplan en el sector NE a E y en la dirección son frecuentes; los vientos muy húmedos soplan en la dirección NE y son dominantes.

9. Radiosondeo en un día típico de vientos alisios

Los radiosondeos atmosféricos, permiten conocer el estado de la atmósfera mediante la medición de la presión, temperatura, humedad relativa, dirección y velocidad del viento desde la superficie del suelo hasta altitudes superiores a los 15 km. Estas informaciones son de gran importancia para el diagnóstico de situaciones meteorológicas con inestabilidad o estabilidad de atmosférica que pueden ocasionar fuertes lluvias o grandes concentraciones de arena sahariana.

Los datos suministrados en los sondeos se introducen diariamente en los modelos matemáticos que mejoran los pronósticos meteorológicos.

Las isolíneas trazadas en el gráfico suministradas por el observatorio meteorológico (Universidad de Wyoming, radiosonda de Güimar a 105 m) a una hora concreta corresponden a la curva de estado real atmosférico (curva de la derecha) y a la curva de estado saturado atmosférico. La curva de estado real, es decir, la temperatura obtenida por la radiosonda en sus diferentes niveles o capas de altura. La curva de estado saturado, es decir, los distintos puntos de rocío o lo que es lo mismo, la temperatura que debería tener el aire para que la humedad relativa alcanzase el 100%.

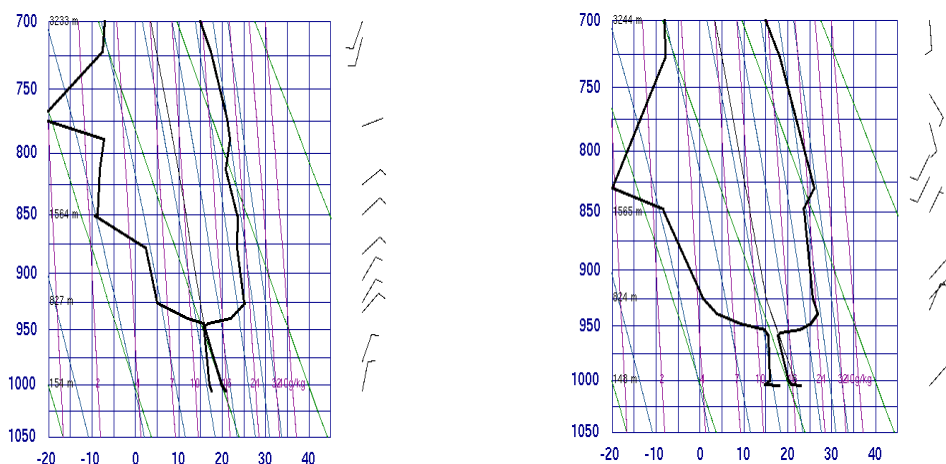


Figura 22.14: Radiosondeo a medianoche y Radiosondeo a mediodía en Güimar.(Fuente; Universidad de Wyoming)

Curva de estado real a medianoche, corresponde a una atmósfera inestable entre 1006 hPa (120 m, vientos del norte noreste, 20.8 °C, 82 %, 14.5 km/h) y 947 hPa (622 m, vientos del noreste, 16 °C, 99 %, 17.7 km/h), a partir de esa cota se observa una inversión térmica, lo que significa que el aire es más caliente que en las capas inferiores, hasta alcanzar los 925 hPa (827 m, vientos del noreste, 25 °C, 28 %, 14.5 km/h), una capa estrecha (205 m) donde la temperatura aumenta bruscamente aproximadamente 4.4 °C/100 m; en cotas superiores, la temperatura sigue disminuyendo, hasta llegar a 700 hPa (3233 m, vientos del sur suroeste, 15 °C, 21 %, 17.7 km/h); son notables las cotas con caídas bruscas de humedad del aire 940 hPa (686 m, vientos del noreste, 22 °C, 53 %, 17.7 km/h) y 779 hPa (2318 m, vientos del este noreste, 21.4 °C, 7 %, 1.6 km/h).

La curva de estado saturado, presenta un descenso suave de la temperatura de rocío de 1006 hPa (17.6 °C, 82 %) hasta los 944 hPa (15.7 °C, 93 %); disminuye moderadamente la temperatura hasta 940 hPa (12 °C, 53 %), disminuye bruscamente la temperatura hasta los 878 hPa (2.4 °C, 25 %, vientos del este noreste) y nuevo descenso muy brusco hasta 851 hPa (-9.4 °C, 16 %, vientos del este noreste) y aumenta suavemente hasta 700 hPa (-7, 21 %). La humedad relativa del aire alcanza valores próximos al 100 % entre las cotas 600 a 650 m, la atmósfera es húmeda estable formación de nubes estratiformes típicas de los vientos alisios sobre la superficie del mar.

Curva de estado real a mediodía, corresponde a una atmósfera inestable entre 1005 hPa (120 m, vientos del noreste, 23 °C, 73 %, 16.5 km/h) y 959 hPa (508 m, vientos del noreste, 17.8 °C, 87 %, 17.7 km/h), a partir de esa cota se observa una inversión

térmica hasta alcanzar los 939 hPa (692 m, vientos del norte noreste, 26.8 °C, 23 %, 19.2 km/h), una capa estrecha (184 m) donde la temperatura aumenta bruscamente aproximadamente 4.9 °C/100 m; en cotas superiores, la temperatura sigue disminuyendo, hasta llegar a 700 hPa (3244 m, vientos del sur, 15 °C, 20 %, 14.5 km/h); son notables las cotas con caídas bruscas de humedad del aire 948 hPa (608 m, vientos del noreste, 25.2 °C, 36 %, 17.7 km/h) y 803 hPa (2060 m, vientos del suroeste, 24.1 °C, 5 %, 17.7 km/h).

La curva de estado saturado, presenta un descenso suave de la temperatura de rocío de 1005 hPa (18 °C, 73 %) hasta los 953 hPa (562 m, viento del noreste, 14.8 °C, 61 %, 17.7 km/h); disminuye moderadamente la temperatura hasta 948 hPa (608 m, vientos del noreste, 9.2 °C, 36 %, 17.7 km/h), disminuye bruscamente la temperatura hasta los 939 hPa (692 m, vientos norte noreste, 3.8 °C, 23 %, 17.7 km/h) y nuevo descenso muy brusco hasta 925 hPa ((824 m, vientos noreste, 0.8 °C, 20 %, 22.4 km/h); es notable la cota con caída brusca de humedad del aire 830 hPa ((1773 m, vientos sur, -20 °C, 4 %, 11.2 km/h). La humedad relativa del aire alcanza valores próximos al 80 % entre las cotas 500 a 550 m, la atmósfera es húmeda estable formación de nubes estratiformes típicas de los vientos alisios.

Bibliografía consultada y referencias

- AGROCABILDO (2010); Estudios climáticos de Tenerife [En línea].Cabildo de Tenerife, [ref. de 1 Octubre 2011]. Disponible en Web: www.agrocabildo.es
- AGROCABILDO (2010); Precipitación de niebla en Santa Cruz de Tenerife[En línea].Cabildo de Tenerife, [ref. de 1 Octubre 2011]. Disponible en Web:www.agrocabildo.org/publica/analisis-climatico/precipitacion_en_niebla.pdf
- AGROCABILDO (2010); *Los alisos en Tenerife* [En línea].Cabildo de Tenerife , [ref. de 1 Octubre 2011]. Disponible en Web: www.agrocabildo.org/publica/analisisclimatico/alisos_2008.pdf
- AGROCABILDO (2008); *Precipitaciones 2008 en Tenerife* [En línea].Cabildo de Tenerife , [ref. de 1 Octubre 2011]. Disponible en Web: www.agrocabildo.org/publica/analisisclimatico/precipitacion2008.pdf
- AGROCABILDO (2008); *Humedad relativa del aire 2008 en Tenerife* [En línea].Cabildo de Tenerife, [ref. de 1 Octubre 2011]. Disponible en Web: www.agrocabildo.org/publica/analisisclimatico/humedad2008.pdf
- AGROCABILDO (2008); *Radiación Solar directa 2008 en Tenerife* [En línea].Cabildo de Tenerife, [ref. de 1 Octubre 2011]. Disponible en Web: www.agrocabildo.org/publica/analisisclimatico/radiacion2008_1.pdf
- AGROCABILDO (2008); *Velocidad del viento 2008 en Tenerife* [En línea].Cabildo de Tenerife, [ref. de 1 Octubre 2011]. Disponible en Web: www.agrocabildo.org/publica/analisisclimatico/velocidad2008.pdf
- AGROCABILDO (2008); *Radiación Solar directa 2008 en Tenerife* [En línea].Cabildo de Tenerife, [ref. de 1 Octubre 2011]. Disponible en Web: www.agrocabildo.org/publica/analisisclimatico/radiacion2008_1.pdf
- AGROCABILDO (2008); *Evapotranspiración potencial Penman 2008 en Tenerife* [En línea].Cabildo de Tenerife, [ref. de 1 Octubre 2011]. Disponible en Web:www.agrocabildo.org/publica/analisisclimatico/evapotrans2008.pdf

- DIVULGAMETEO (2011); *Estudios meteorológicos. Biblioteca digital* [En línea]. [ref. de 1 Octubre 2011]. Disponible en Web: www.divulgameteo.es
- DIVULGAMETEO (2009); *Situaciones meteorológicas en días lluviosos 2009. Biblioteca digital* [En línea]. [ref. de 1 Octubre 2011]. Disponible en Web: www.divulgameteo.es/uploads/Lluvias-Tenerife-Agrocabildo.pdf
- FONT TULLOT, I. (1983). *Climatología de España y Portugal*. Ed. Instituto Nacional de Meteorología.
- NIMBUS. [En línea]. *Conceptos básicos de meteorología sinóptica* [ref. de 1 Octubre 2011]. Disponible en Web: www.nimbus.com.uy/weather/pdf/cap11.pdf
- MEDINA ISABEL, M. (1976). *Meteorología básica sinóptica*. Ed. Paraninfo.
- VIÑAS, JM. (2010). *Introducción a la meteorología*. Ed. Almuzara.
- WEATHER. *Radiosondeos atmosféricos* [ref. de 1 Octubre 2011]. Disponible en Web: <http://weather.uwyo.edu/upperair/africa.html>

Hidrometeorología en las Islas Canarias II.

Situaciones extremas

Luis Manuel Santana Pérez

1. Invasiones de aire polar marítimo. Frente polar

Cuando dos masas de aire de características diferentes entre sí, no se mezclan, aparece una zona que marca la separación entre las dos. A esta zona se la conoce como zona frontal, y es la franja en donde se distingue con más facilidad el cambio de las condiciones físicas del aire (temperatura, presión, humedad, etc.). Puede extenderse desde unos cientos de metros, cuando la diferencia de temperatura de las masas de aire es muy brusca, a varios kilómetros cuando el contraste es más suave.

En un mapa meteorológico de superficie, la zona frontal se confunde con una superficie frontal dado su pequeño espesor, y la intersección de esta superficie frontal con la superficie terrestre se conoce como frente.

La superficie de separación entre dos masas de aire no es paralela ni perpendicular a la superficie terrestre, sino que tiene una mayor o menor inclinación (pendiente), debido a la diferencia de densidad y a que aquellas se encuentran en movimiento. La pendiente de los frentes puede variar entre $1/30$ a $1/100$ para los frentes fríos y $1/100$ a $1/400$, aproximadamente, para los frentes cálidos.

Un frente frío es más activo cuanto más pasiva sea la masa cálida de delante. Si el frente tiene que empujar a la masa cálida, ésta será lanzada hacia arriba, originándose ascendencias y condensaciones. La componente del viento, normal a la base

del frente en tierra, es mayor en las capas bajas que en las capas altas. En efecto, al ser mayor la velocidad de la masa fría, ésta tropieza con la cálida, metiéndose en cuña por debajo y lanzando el aire cálido a lo alto. El frente frío va acompañado de nubes de notable desarrollo vertical, tipo “cúmulo” acompañadas precipitaciones importantes en forma de chubascos, granizo y aguaceros.

La “banda” de mal tiempo es relativamente estrecha, con una anchura de unos 100 a 150 km, y su traslación suele ser rápida, por lo que la mejoría, con apertura de grandes claros, ocurre poco después del paso del frente.

Un frente frío activo suele caracterizarse porque a su paso cambia bruscamente la dirección del viento (entre 45 y 180 ° de giro); el viento se hace racheado; la temperatura descende; la visibilidad aumenta, aire más transparente, salvo que sea dificultada por un chaparrón (Medina M, 1976).

Las invasiones de aire frío en Canarias se notan mucho más claramente por encima de los 1500 m que al nivel del mar, En Izaña suelen ir acompañadas de fuertes descensos de temperatura, la fuerza del viento aumenta considerablemente. A bajos niveles la velocidad del viento es siempre mucho menor, y respecto al descenso de temperatura es siempre mucho menor. Por consiguiente, durante las invasiones, la temperatura descende con el aumento de altitud, desaparece la clásica inversión de temperatura de los vientos alisios.

La masa de aire polar que invade Canarias es muy inestable. Esta inestabilidad, al ser liberada por la ascendencia provocada por el relieve, se traduce en una actividad convectiva que puede ser muy vigorosa, dando lugar a diversos hidrometeoros: nevadas, cencelladas, precipitaciones intensas.

Respecto a la cuantía de las precipitaciones originadas, pueden variar entre amplios límites, dependiendo, del grado de inestabilidad que se cree y de la riqueza en vapor de agua de la masa de aire polar. El factor juega un importante papel, de forma que los lugares favorablemente a la acción de los movimientos convectivos pueden registrar precipitaciones superiores a 100 mm en 24 horas. Sin la influencia del factor orográfico las precipitaciones son generalmente poco importantes.

Este tipo de tiempo se presenta fundamentalmente en otoño, invierno y primavera. Después de un mínimo estival notable, la frecuencia sube rápidamente hasta alcanzar el máximo en noviembre, y después de cierto descenso invernal vuelve a subir para llegar al máximo secundario de marzo o abril. La mayor frecuencia de estas

invasiones en noviembre es responsable de que en aquellas zonas favorablemente expuestas, sea dicho mes el que registre la mayor cantidad media de precipitación.

Normalmente estas invasiones duran varios días, en marzo y noviembre pueden llegar a durar más de diez, aunque generalmente no alcancen los cinco. En verano, las ocasionales invasiones no producen en el tiempo más cambio que un descenso en la temperatura, un aumento en la nubosidad en las medianías independientes de su orientación y un aumento en la velocidad del viento

Respecto a la situación en el mapa sinóptico, éste puede presentar notables variaciones, pero siempre se presenta, como característica general, un anticiclón atlántico más o menos importante (Font Tullot I, 1983).

El frente polar es una pared elástica, no vertical sino inclinada; el aire polar es denso y tiende a meterse en cuña por debajo del aire tropical, el cual, más ligero, se desborda por arriba deslizándose a lo largo de la superficie frontal. El frente polar es una superficie de discontinuidad, que avanza o retrocede según empuje más energicamente la masa polar o la masa tropical. El trozo de frente empujado por el aire frío es un “frente frío o invasión fría” y el empujado por el aire cálido es un “frente cálido o invasión cálida”.

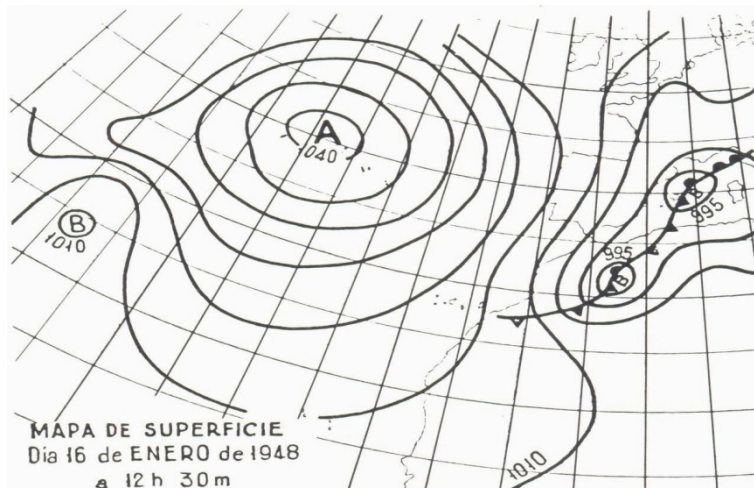


Figura 23.1; Invasión de aire polar el 16 de enero de 1948.

1.1. Sistema frontal nuboso o advección de aire polar marítimo

El mapa sinóptico siguiente en superficie indica anticiclón intenso sobre el Atlántico oriental centrado en las Azores, borrasca profunda al norte de Marruecos y un frente frío ha atravesado las islas. Vientos expulsados del área de alta presión en contacto con la superficie marina fría, vientos moderados, templados y muy húmedos soplan en el sector noroeste a norte ascienden sobre las laderas expuestas a su acción. Precipitaciones débiles en la costa, moderadas en las medianías y fuertes en las cumbres. Las precipitaciones recogidas los días 16 y 17 de enero: Santa Cruz de Tenerife 1.9 mm y 13.4 mm, Punta Hidalgo 5.4 mm y 10.6 mm, La Laguna 10 mm y 44.7 mm, Tacoronte 6.4 mm y 45 mm, San Juan de la Rambla 22.4 mm y 9 mm, El Tanque 31 mm y 22 mm, Santiago del Teide 33 mm y 5.3 mm, Izaña 8.6 mm y 67.1 mm.

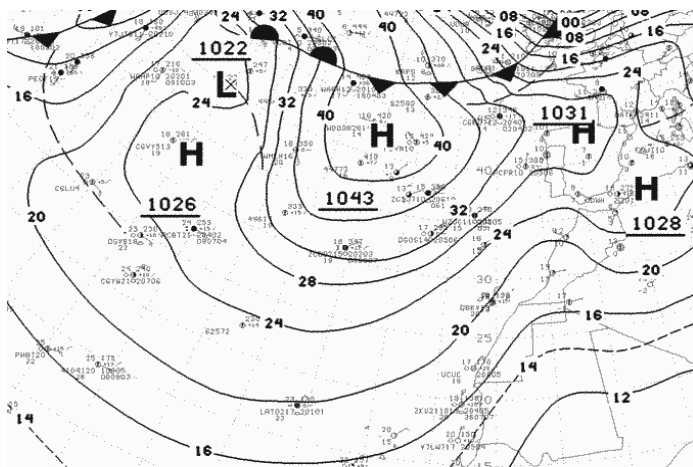


Figura 23.2; Invasión de aire polar el 18 y 19 de marzo de 2007.

El mapa sinóptico día 18 indica el anticiclón de las Azores muy intenso, zona anticiclónica en la península Ibérica y una zona depresionaria poco profunda (1012 mb) al oeste de Mauritania. Vientos expulsados del área de alta presión llegan a las costas del archipiélago, vientos cálidos, muy húmedos y débiles que soplan en el sector noroeste a noreste ascienden sobre las laderas de las vertientes expuestas en dirección norte. Precipitaciones moderadas a fuertes entre las 18 h a 24 h en la vertiente noroeste a este: Buenavista del Norte 15 mm, Ruigómez 19 mm, Charco del Viento 22.5 mm, El Rincón 61.1 mm, La Suerte 29.7 mm, La Corujera 81.2 mm, La Cruz Camino 71.6 mm, La Victoria - Lomo 87.2 mm, Ravelo 54.8 mm, Los Rodeos 120.8 mm, Tejina 26.9 mm, Fajanetas 33 mm, Azanos 26.9, Santa Cruz de Tenerife

74.1 mm, Añavingo 8.9 mm, Barranco Badajoz 5.6 mm, El Bueno 0.7 mm, Llanos San Juan 0 mm, Aeropuerto Reina Sofía 0.1 mm, Las Galletas 1.6 mm, Guía Isora 0.1 mm, Barranco Ortíz 8.3 mm, Pinalete 7.3 mm e Izaña 22.7 mm.

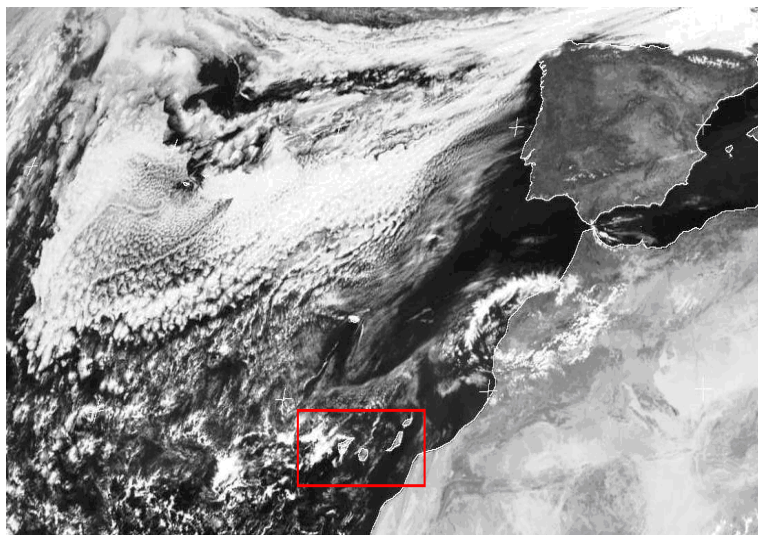


Figura 23.3; Imagen del satélite Meteosat 9 (visible e infrarrojo/vapor): 18 de marzo a las 12 h UTC

La imagen visible indica un frente nuboso atravesando las islas más occidentales de Canarias. El frente ha alcanzado la costa sur a noroeste de Tenerife. Cubierto en la costa y medianía de la vertiente noroeste a este, nubes y claros en la vertiente suroeste a oeste y cielos despejados en la zona central de la isla.

El mapa sinóptico día 19 indica anticiclón de las Azores potente, zona anticiclónica en el noroeste de África y una zona depresionaria poco profunda (1012 mb) al oeste de Mauritania: cuña ciclónica. Los vientos expulsados del área de alta presión llegan a las costas de las islas, vientos cálidos, muy húmedos y débiles que soplan en el sector norte a este ascienden sobre las laderas. Precipitaciones moderadas a fuertes entre las 0 h a 9 h en la vertiente noroeste a este: Buenavista del Norte 51.4 mm, Tierra Trigo 35.1 mm, Ruigómez 39.5 mm, Charco del Viento 51.5 mm, Santa Bárbara 35.4 mm, Realejos Alto 35.1 mm, El Rincón 54.9 mm, La Suerte 29.3 mm, La Corujera 100.3 mm, Cruz del Camino 115.7 mm, Lomo 106.6 mm, Ravelo 108 mm, Agua García 88.7 mm, La Padilla 74.8 mm, Tejina 7.4 mm, Fajanetas 0 mm, Los Rodeos 2.9 mm, Santa Cruz de Tenerife 0 mm, Añavingo 16.9 mm, Barranco Badajoz 10.7 mm, Llanos de San Juan 0 mm, El Bueno 4.1 mm, Charco del Pino 0.1 mm, El Frontón 0.2 mm, Guía de Isora 0.2 mm, Valle Arriba 18.6 mm, Playa San Juan 0 mm, El Pinalete 0.1 mm e Izaña 6.8 mm.

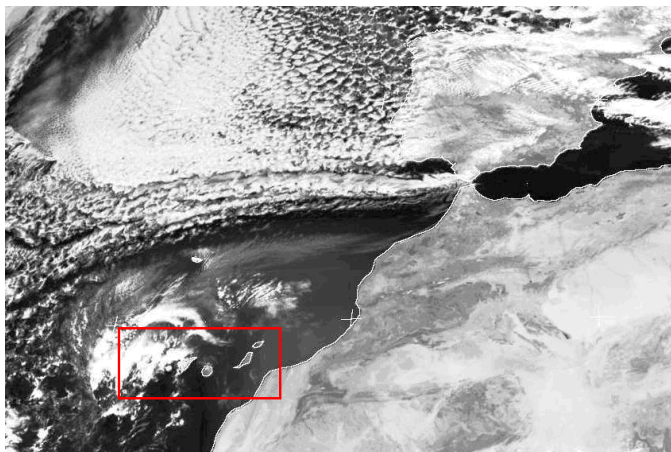


Figura 23.4; Imagen del satélite Meteosat 9 (visible): 19 de marzo a las 12 h UTC.

La imagen visible indica un frente nuboso atravesando las islas más occidentales de Canarias. El frente ha alcanzado Tenerife, nubosidad estratiforme generalizada.

La irrupción del aire frío marítimo muy húmedo alcanza la costa y asciende por las laderas noroeste a norte entre las últimas horas de la tarde y las primeras horas de la mañana. Su acción desencadena precipitaciones intensas en la costa y medianía de la vertiente noreste a este. Movimientos convectivos potentes en la comarca de Tacoronte - Acentejo y llanos de los Rodeos. La franja costera y medianía baja, cotas inferiores a 900 m, en la vertiente este a noroeste y zona de alta montaña, cotas superiores a 2400 m, recibe la menor cantidad de precipitación ($P < 10$ mm), lo contrario, la franja costera norte y medianía de la comarca Tacoronte - Acentejo, recibe la mayor cantidad de precipitación ($100 \text{ mm} < P < 150 \text{ mm}$). Son notables, las precipitaciones recogidas en la costa y medianías bajas de las vertientes noroeste a este ($30 \text{ mm} < P < 100 \text{ mm}$); también destacan las precipitaciones recogidas en el Valle de Güimar y en los pinares ($10 \text{ mm} < P < 39 \text{ mm}$). La precipitación acumulada en el periodo vespertino y diurno: Aeropuerto Reina Sofía 0.1 mm, Guía de Isora 0.3 mm, La Planta 11.5 mm, Añavingo 25.6 mm, Las Caletillas 24.6 mm, Los Rodeos - sotavento 123.7 mm, Santa Cruz de Tenerife 74.1 mm, Santa Cruz - Barranco. Huertas 89.3 mm, Taganana - Azanos 28.5 mm, Anaga - Roque Negro 40 mm, Tejina 34.2 mm, Ravelo 162.7 mm, Agua García 133 mm, La Cruz Camino 187.1 mm, La Victoria - Lomo 193.6 mm, Santa Ursula - Corujera 181.4 mm, Benijos 49.1 mm, Aguamansa 74 mm, Izaña 29.5 mm, Botánico 114.5 mm, San Juan de la Rambla 90.2 mm, Charco del Viento 74 mm, Buenavista del Norte 66.4 mm y Teno - La Sahorra 40.2 mm.

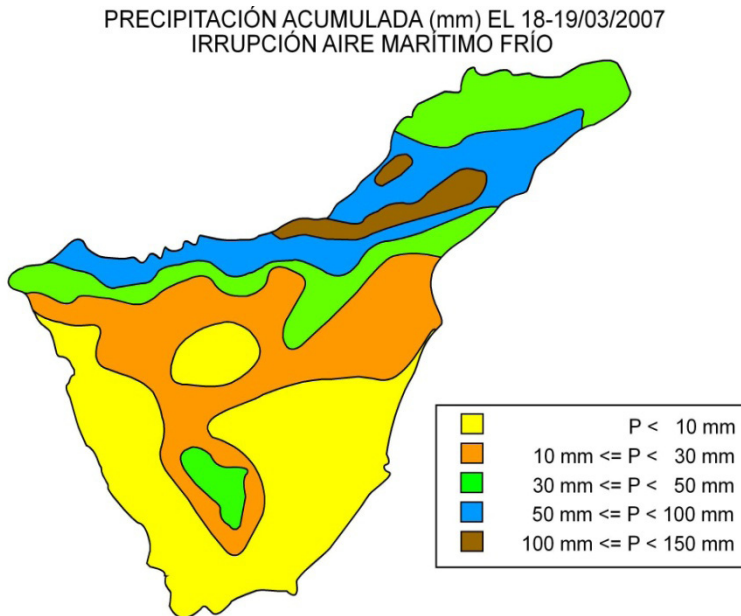


Figura 23.5; Precipitaciones acumuladas en la irrupción de un frente de aire marítimo frío.

2. Borrascas extratropicales o borrascas atlánticas en las islas Canarias

2.1. Generalidades previas

El aire en su desplazamiento latitudinal sufre un “empuje lateral”, acción de la aceleración de Coriolis. Las zonas longitudinales de presión en el hemisferio norte bien definidas en dirección ecuador – polo norte son: bajas presiones ecuatoriales, altas presiones subtropicales, bajas presiones subpolares y altas presiones polares. Las bajas presiones son zonas de convergencia de aire, absorbe aire. Las altas presiones son zonas de divergencia de aire, expulsa aire. Los vientos de dirección noreste son los levantes polares y alisios subtropicales. Los vientos de dirección suroeste son los ponientes de la zona templada. Por lo tanto, la zona de baja presión subpolar (zona de convergencia) absorbe levantes polares y ponientes, y la zona de alta presión subtropical (zona de divergencia) expulsa ponientes y alisios.

La masa de aire fría tiende espontáneamente a situarse debajo de la cálida para que haya equilibrio estático, con la superficie de discontinuidad horizontal siempre que no exista movimiento. Pero si el aire se mueve horizontalmente (o sea si hay viento), la aceleración de Coriolis actuará hacia la derecha del viento, separando las masas de aire y neutralizando esa tendencia espontánea a situarse una sobre la otra.

En el caso del frente polar, las componentes tangenciales del viento son directamente opuestas a un lado y a otro, ya que el aire polar sopla con componente del este y el aire tropical con componente oeste. La corriente de aire polar, por ser la más fría, discurre directamente sobre el suelo, sufriendo un mayor rozamiento que la corriente cálida que se desliza por la rampa del frente. Si este rozamiento se hace intenso, el frenado del aire polar será grande, pudiendo a llegar a ser tal que la acción de Coriolis no sea suficiente para impedir que el aire frío se meta espontáneamente por debajo del cálido más profundamente, en latitud, de lo que es normal. La pendiente del frente disminuye, hasta colocarse éste casi horizontal en el seno del aire.

En consecuencia, los sitios más idóneos para producirse invasiones o irrupciones frías hacia la zona templada, son los situados al este de obstáculos naturales. La experiencia demuestra la gran frecuencia de irrupciones frías al este de Groenlandia o al este de la península de Labrador.

Jacob Bjerknes y Halvor Solberg meteorólogos nórdicos publicaron en 1921 un esquema sobre la formación de borrascas ondulatorias del frente polar:

Las irrupciones de aire frío, rebasando éste la barrera polar que supone el frente, ocurre cuando el aire polar es frenado bruscamente en su desplazamiento hacia el oeste a impulso de los levantes de las latitudes altas. Por el contrario, una aceleración de estos levantes localizada en un determinado lugar, produce el efecto contrario haciendo aumentar la pendiente de superficie frontal, que se pondrá más vertical. El aire polar acelerado, al embestir contra la superficie frontal abomba ésta hacia la zona templada, apareciendo una deformación en el frente (figura a). Comienza un movimiento ciclónico (movimiento contrario agujas de reloj) a lo largo del frente polar, surge un torbellino ciclónico que impulsa al aire caliente contra la pared frontal, haciéndola ponerse más vertical allí donde el aire cálido se hace más veloz.

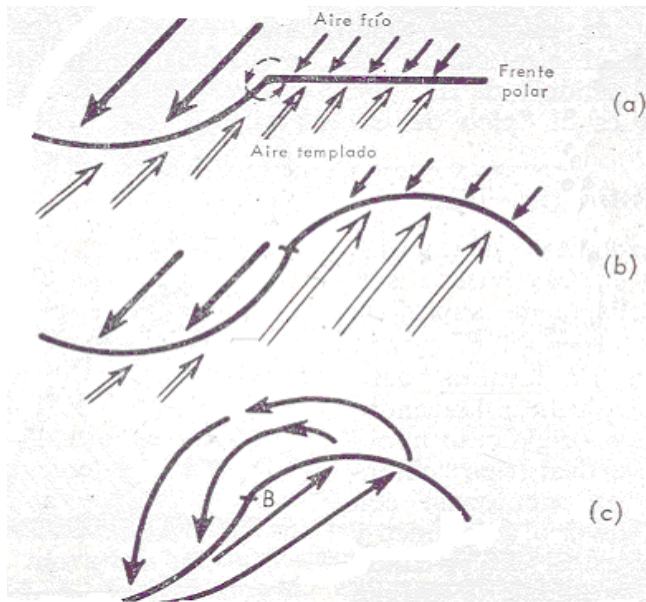


Figura 23.6; Formación de una borrasca, por ondulación del frente polar (hemisferio norte).

La consecuencia es que delante de ese aire cálido se abomba a su vez la superficie frontal (figura b). El final es que el torbellino se convierte en una clara y extensa área de circulación ciclónica, con la consiguiente convergencia y descenso de la presión, lo que origina el nacimiento de un mínimo barométrico, nace una borrasca (figura c). Esta, se ha formado por una ondulación del frente polar.

El trozo de frente empujado por el aire frío es un frente frío y el empujado por el aire cálido es un frente cálido. Son estas borrascas ondulatorias las únicas que llevan frentes; como consecuencia se las designa como borrascas extratropicales para diferenciarlas de las depresiones tropicales y de los ciclones.

La parte de la borrasca comprendida entre los dos frentes, donde está confinado el aire cálido que se desborda por arriba, se conoce como “sector cálido” de la borrasca (Medina M, 1976).

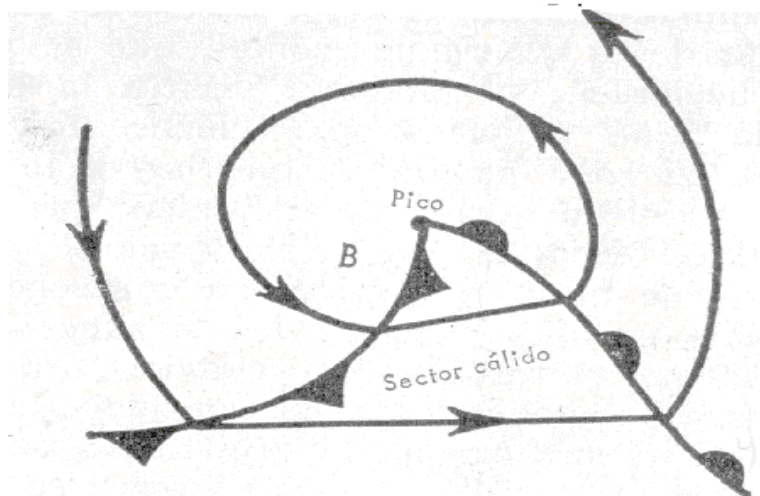


Figura 23.7; Sectores adjuntos a una borrasca extratropical atlántica.

2.2. Borrasca atlántica en las islas Canarias

Durante el semestre otoñal e invernal, principalmente en los meses de diciembre y enero, el archipiélago puede quedar sometido a la acción directa de borrascas de características análogas a las de la zona templada, borrascas extratropicales.

La forma en que dichas borrascas repercuten en el tiempo de las islas Canarias depende de varios factores: intensidad, estado de desarrollo, posición geográfica del centro, situación e intensidad de los frentes, etc. Pero, entre ellos, hay uno fundamental, por hacer entrar en juego el factor orográfico: según sea la trayectoria que siga la borrasca, el archipiélago puede quedar sometido sólo al flujo de los vientos del cuarto cuadrante de la parte posterior de la depresión, o bien primero a los vientos de componente sur, para pasar luego a los de componente norte. En el primer caso, nos encontramos con un tipo de tiempo análogo al de las irrupciones de aire polar. En el segundo caso, cuando la corriente del sur sea rica en vapor de agua, el efecto de la ascendencia geográfica puede provocar lluvias muy intensas.

Otra circunstancia muy importante a tener en cuenta es la del viento en superficie, pues dichas borrascas son responsables de la mayor parte de los temporales de viento que ocasionalmente, tan graves perjuicios causan en los cultivos de las islas,

jugando también ahora el relieve un papel fundamental, ya que la forma de actuar de las distintas direcciones del viento están influidas por las condiciones locales del relieve. Un ejemplo, en Tenerife, los temporales del tercer cuadrante suelen ser especialmente perjudiciales, y no sólo en los valles abiertos a dichos vientos, sino que también, ocasionalmente, son responsables de los mayores daños causados en los cultivos de las vertientes del norte de Tenerife. Ello ocurre cuando una fuerte corriente del suroeste, después de remontar la cumbre, desciende por la ladera opuesta con mayor intensidad al ser encajonada en los valles (Font I, 1983).

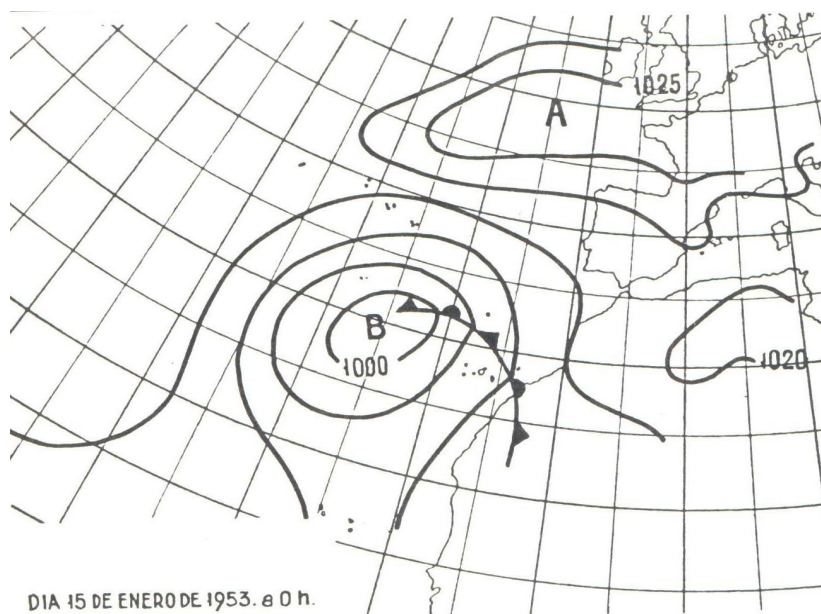


Figura 23.8; Situación típica de los temporales del suroeste el 15 de Enero de 1953.

La borrasca atlántica va acompañada de vientos fuertes del tercer cuadrante y lluvias copiosas, que en los lugares más favorecidos totalizaron por encima de los 100 mm en 24 horas, fue responsable de importantes daños en los cultivos.

2.3. Borrasca atlántica del 20 de diciembre de 2005

El mapa sinóptico indica una baja presión poco profunda al noroeste de Canarias, un frente nuboso atravesando el archipiélago canario y ausencia de la depresión sahariana. Los vientos que acompaña al frente nuboso son débiles a moderados en

Son notables, las precipitaciones recogidas en la costa y medianía baja del Valle de Güimar; en la costa de la comarca de Isora y medianía baja de las comarcas de Abona e Isora ($50 \text{ mm} < P < 100 \text{ mm}$).

Las precipitaciones acumuladas en los tres días de la irrupción del frente nuboso: La Planta (120 m) 69 mm, Llanos de San Juan 53 mm, San Miguel de Abona (590 m) 86.5 mm, Adeje (310 m) 95 mm, El Pinalete (850 m) 127 mm, Taucho (910 m) 150 mm, El Pozo 122 mm, Los Llanitos (1032 m) 113 mm, Vilaflor 174 mm, Parque Nacional – El Encerradero (2100 m) 175.5 mm, Base del Teleférico (2320 m) 114 mm y Parador del Teide (2160 m) 149 mm.

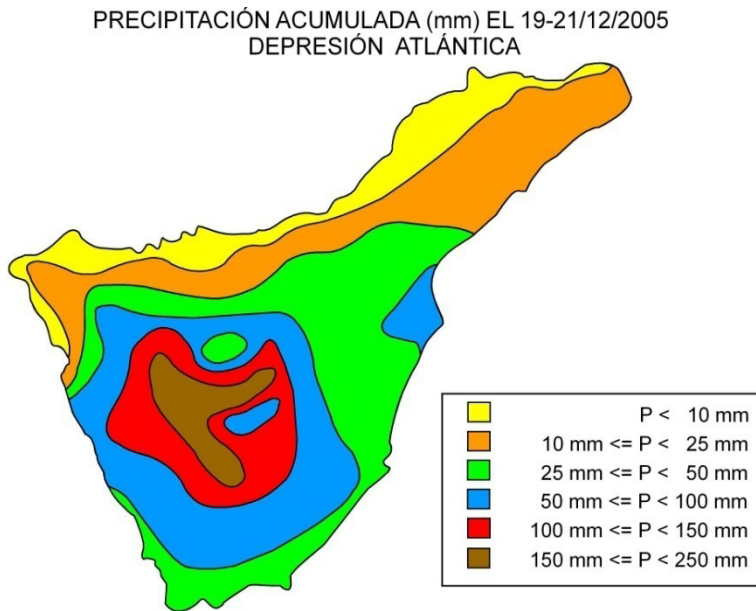


Figura 23.10; Precipitación acumulada depresión atlántica el 19-21/12/2005.

3. La gota fría

Se entiende, coloquialmente, como gota fría a cualquier situación meteorológica que lleve o pueda llevar asociada lluvias intensas, efectos desastrosos, independientemente del marco sinóptico donde se desarrollan las precipitaciones. Este concepto no está basado en aspectos meteorológicos precisos.

Una gota fría o DANA (Depresión Aislada en Niveles Altos de la Atmósfera) según Sherhag es “una marcada depresión en altura, sin reflejo en superficie, en cuya parte central se encuentra el aire más frío”. Es decir, no es una borrasca con sus frentes asociados y bajas presiones en superficie, sino un embolsamiento de aire frío en altura, por encima de los 5.500 metros (entre 300 y 500 mb).

A mediados del siglo pasado, con la mejora de los métodos de observación, se comprobó que algunas gotas frías podían tener reflejo en el campo de presión en superficie pero no llevaban asociado ese contraste de masas de aire frío-cálido, típico de los sistemas frontales. Cuando debajo de la perturbación fría en altura se apreciaba una baja en superficie con una circulación cerrada, entonces decimos que se ha generado una borrasca fría aislada.

Las nuevas teorías modernas en meteorología dinámica señalan que las depresiones de altura tienen un reflejo en niveles bajos y superficie, que se manifiesta en forma de algún tipo de anomalía (presión, temperatura, estabilidad, viento, etc.).

3.1. Las corrientes en chorro y el aislamiento de circulaciones intensas en altura: Depresión Aislada en Niveles Altos (DANA)

La existencia de intensas corrientes canalizadas que circunvalan la Tierra, aproximadamente a unos 9.000 m de altura o a 300 hPa en nuestras latitudes. A estas circulaciones concentradas en niveles altos se les denominan corrientes en chorro. Su ubicación exacta hay que buscarla en la tropopausa y, particularmente, en los dobleces de la tropopausa donde existen intercambios de aire entre la estratosfera y troposfera. Existen distintos tipos de chorros a diferentes latitudes, el más conocido es el chorro polar. Este lleva asociados máximos de vientos muy intensos, que superan ampliamente los 180 Km/h.

La dirección que normalmente posee el chorro es zonal: fluye de oeste a este rodeando a la Tierra y está limitado a un cinturón de latitudes medias. En el hemisferio norte y en el lado izquierdo del chorro polar, o el lado que “mira” al polo Norte, el aire es relativamente frío. En su lado más meridional el aire es más cálido que el del lado polar. Cuando el chorro, originalmente rectilíneo, se intensifica, se ondula y toma una componente norte-sur muy marcada, se puede generar un proceso de aislamiento y estrangulamiento de parte de esta circulación intensa. Estas circulaciones se aíslan de la circulación general, se alejan de las zonas de origen y llegan a

cerrarse sobre sí mismas. Las primeras ideas sobre este nuevo enfoque y origen de las gotas frías provienen de Palmen y Newton (1969).

En las latitudes de las islas Canarias, podemos estar afectados también por el chorro subtropical: un cinturón de vientos máximos zonal muy concentrado, equivalente al polar, pero situado en latitudes más bajas y a mayor altura, entre 11.000 y 13.000 m, aproximadamente. El chorro subtropical se puede separar y aislar un ramal o circulación cerrada cuando éste llega a ondularse marcadamente.

El resultado de este proceso es la presencia y generación de circulaciones cerradas y separadas de la zona “madre” originaria. Se forma una depresión en altura que posee una circulación propia, independiente y que ha perdido el contacto con la circulación que la generó (polar o subtropical), desplazándose de forma independiente del flujo de los vientos del oeste.

3.2. Las depresiones frías en altura en Canarias

La importancia de las depresiones frías en altura en el clima de Canarias es verdaderamente extraordinaria; las bajas latitudes en que se suelen formarse permiten que se muestren cómo el agente más eficaz en hacer que las perturbaciones de la circulación atmosférica de la zona templada llegue a afectar directamente a la región subtropical. Estas depresiones son responsables de las lluvias muy intensas que ocasionalmente tienen lugar en Canarias.

La presencia de las depresiones frías de altura en las proximidades de Canarias supone un cambio radical en las condiciones del tiempo. Ya que la estratificación muy estable del aire normal de los alisios es sustituida por otra muy inestable. En ocasiones basta esta inestabilidad para que se produzcan lluvias intensas; pero, cuando la depresión acaba por manifestarse en superficie, la circulación correspondiente puede ser responsable de que fluya hacia el archipiélago aire tropical caliente y muy húmedo, y cuando éste es obligado ascender por el escarpado relieve de las islas y la mencionada inestabilidad, explica la posibilidad de desencadenar lluvias torrenciales.

La máxima frecuencia de estas depresiones tiene lugar en el trimestre de noviembre a enero. Algunas se presentan de febrero a mayo, y menos frecuentemente de septiembre a octubre. Durante el trimestre junio a agosto las islas están prácticamente libres de influencia de las perturbaciones: aunque, en casos excepcionales, suceda

que en pleno verano alguna depresión fría de altura poco intensa se acerque lo suficiente al archipiélago para llegar a perturbar su tiempo.

Hemos de insistir en que, al menos en los casos más intensos, este tipo de tiempo tiene siempre un carácter ocasional, ya que es posible que no se presente ni un sólo caso durante varios años consecutivos.

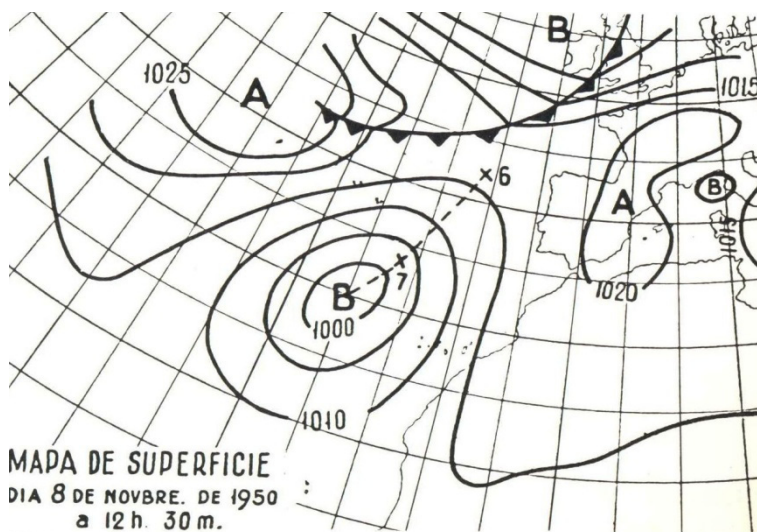


Figura 23.11; Situación meteorológica el 8 de noviembre de 1950.

El mapa sinóptico anterior, indica una baja presión en superficie al noroeste de Canarias que días anteriores se había desplazado desde latitudes más altas. Un anticiclón poco intenso se sitúa al este de la península Ibérica.

En el observatorio de Izaña el 8 de noviembre se registraron vientos fuertes con velocidades superiores a 70 Km/h, soplaron en el sector sur a oeste a suroeste, y la borrasca no desarrolló nevadas; por lo contrario, en Santa Cruz de Tenerife los vientos son débiles a moderados con velocidades inferiores a 36 km/h y soplaron en la dirección sur.

Precipitaciones generalizadas en Tenerife: precipitaciones abundantes en la costa y medianías en la vertiente sur a oeste y torrenciales en las cumbres orientadas a la vertiente sur. Las precipitaciones recogidas los días 8 y 9 de noviembre: Santa Cruz de Tenerife 34 mm y 50.5 mm, Punta Hidalgo 65.5 mm y 115 mm, Taganana 20 mm y 62.2 mm, Los Rodeos 149.6 mm y 129.6 mm, La Matanza 130 mm y 63 mm, Agua-

mansa 127.2 mm y 65.9 mm, Vilaflor 62 mm y 147 mm, Santiago del Teide 50.6 mm y 94.4 mm, Izaña 101.3 mm y 224.4 mm, Güimar - El Escobonal 95.4 mm y 99.7 mm y Arona - Faro de Rasca 38 mm y 34.4 mm.

3.3. Situación meteorológica el 31 de marzo de 2002

Aires del suroeste no previstos aprisionaron las nubes contra las montañas de Ana-ga y provocaron que la gota fría descargara en Santa Cruz de Tenerife durante horas, mucho más tiempo del normal. (ABC domingo 7 de abril de 2002).

Precipitaciones torrenciales en el municipio de Santa Cruz de Tenerife.

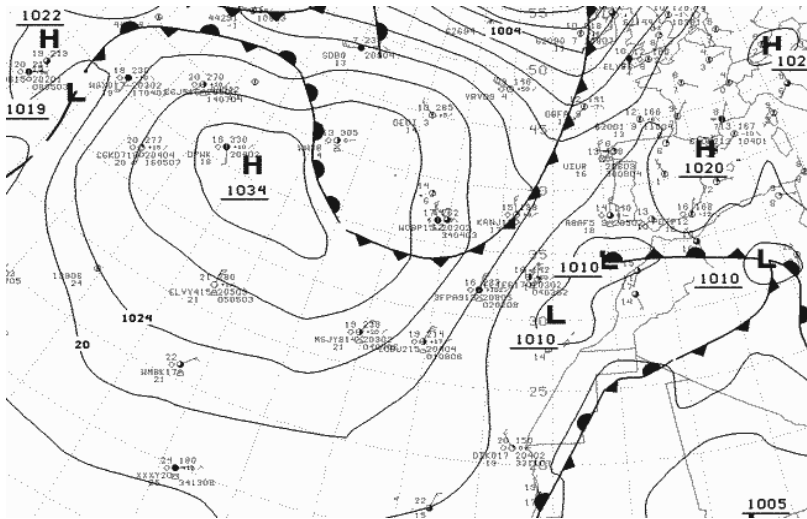


Figura 23.12; Mapa sinóptico de superficie de la depresión fría en altura o gota fría del 31 de marzo de 2002.

El 31 de marzo de 2002 se produjo un fenómeno de gota fría cayendo lluvias torrenciales acompañadas en ciertos momentos de aparato eléctrico, afectando al área metropolitana de Santa Cruz de Tenerife y extendiéndose en dirección NE hacia la zona de San Andrés.

Es importante reseñar que las precipitaciones torrenciales afectaron a un área muy reducida del entorno de la capital tinerfeña. Descargó 232.6 l/m² en 24 horas y 129.9 l/m² en una hora, significando el primer dato la mayor cantidad de agua recogida en

la ciudad en un sólo día desde que se iniciaron las observaciones meteorológicas. La lluvia comenzó a caer con intensidad en la capital y alrededores entre las 15 y las 16 horas, mientras que un poco más al norte y al sur apenas caían algunas gotas. Escampó una media hora y a continuación arrancó de nuevo a llover con gran intensidad y con pedrisco hasta las 20 horas manteniéndose algunas horas de precipitaciones más débiles hasta medianoche. (El DIA 4 de abril de 2002).

Las lluvias ocasionaron 8 muertos, 12 desaparecidos y decenas de heridos. Además de las pérdidas humanas la riada causó cuantiosos daños materiales, 70.000 personas sin luz así como la destrucción total o parcial de al menos 400 viviendas. Las pérdidas se calcularon en 90 millones de euros. (ATAN 31 de marzo de 2002).

El mapa sinóptico anterior, indica una baja presión poco profunda sobre Canarias (1010 mb), un frente frío atravesará Canarias y el anticiclón Atlántico de las Azores (1034 mm).

El mapa sinóptico trazado a las 0 h no nos hace sospechar que apenas unas horas posteriores desencadenasen las precipitaciones más intensas registradas en Santa Cruz de Tenerife. Ello fue debido a la gran inestabilidad provocada por la depresión que aparece muy bien definida en el mapa de altura. Vientos débiles soplan en el sector sur a noroeste en la costa de la vertiente sur a noroeste.

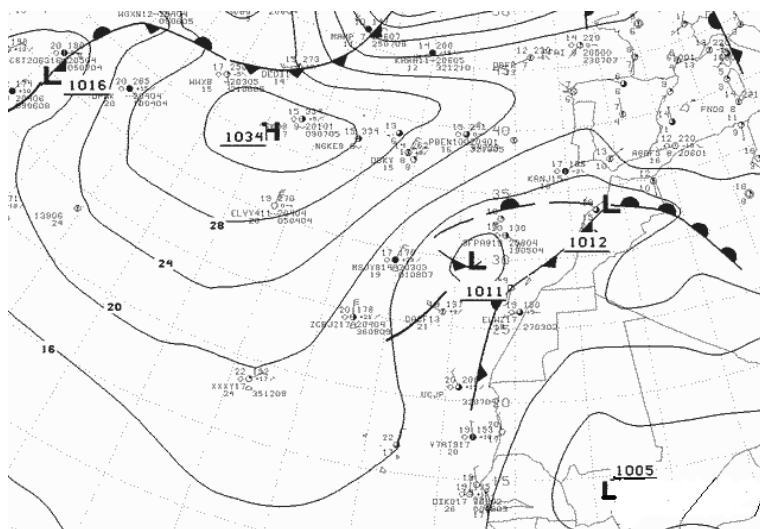


Figura 23.13; Mapa sinóptico de superficie del día posterior a la formación de la depresión fría en altura.

Vientos débiles soplan en el sector sureste a sur en la vertiente oeste. Vientos débiles soplan en el sector sureste a sur en las medianías oeste. Vientos débiles a fuertes soplan en el sector sur a oeste en la vertiente sureste a sur; la racha máxima y dirección del viento: Los Rodeos 38.8 km/h NW y Aeropuerto Reina Sofía 40 km/h NW.

El mapa sinóptico anterior, indica una baja presión (1011 mb) poco profunda al noroeste de África, un frente frío atraviesa la costa noroeste de África y el anticiclón Atlántico intenso (1034 mm) al noroeste de las islas Azores.

El mapa sinóptico trazado a las 0 h no indica “peligrosidad”, y apenas unas horas anteriores precipitaciones torrenciales desencadenadas por la depresión fría en altura que atravesó el municipio de Santa Cruz de Tenerife. Vientos débiles soplan en Tenerife.

Los vientos soplan en la dirección noreste y en el sector sureste a sur en la costa de la vertiente noreste a este; la racha máxima y dirección del viento: Santa Cruz de Tenerife 42.1 km/h NW, Los Rodeos 60.8 km/h NNW y Aeropuerto Reina Sofía 22 km/h WSW. Precipitaciones débiles a moderadas en Tenerife.

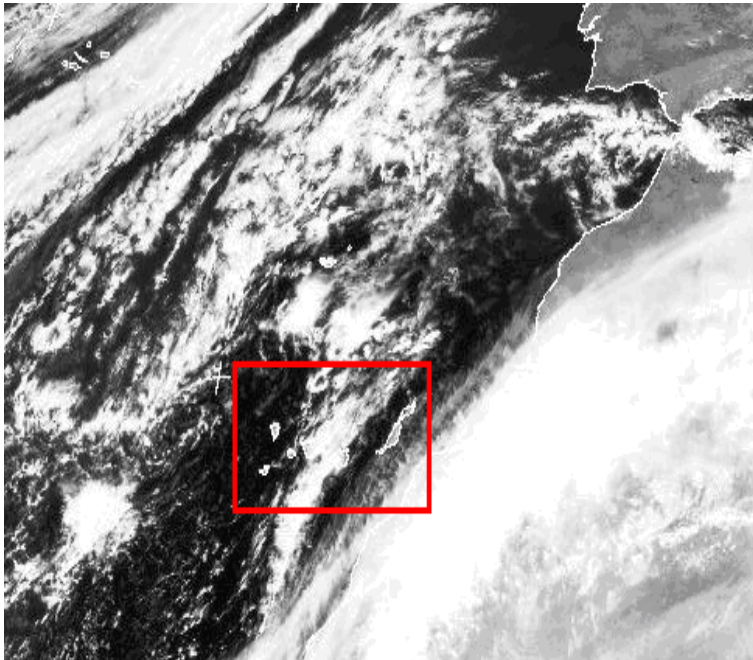


Figura 23.14; 9 (visible): 31 de marzo a las 12 h UTC

La imagen diurna visible indica una masa nubosa de poco desarrollo vertical sobre Tenerife. La nubosidad está asociada a la depresión en altura y totalmente desvinculada a los fenómenos asociados a la frontogenesis característicos de otros tipos de depresiones. Un frente nuboso sobre Marruecos ajeno a los fenómenos hidrometeorológicos que se desarrollaran a pocas horas del registro de la imagen.

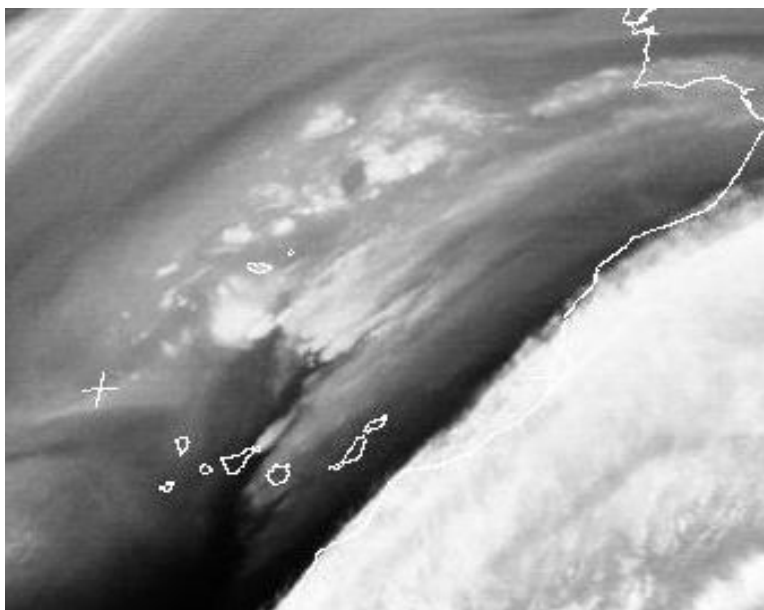


Figura 23.15; Meteosat 9 (infrarrojo): 31 de marzo a las 15 h y 18 h UTC.

Las imágenes vespertinas indican una masa nubosa singular con gran contenido acuoso sobre el municipio de Santa Cruz de Tenerife. La nubosidad está asociada a la depresión en altura en plena actividad convectiva. La masa nubosa es arrastrada por vientos muy húmedos de gran intensidad que soplan en dirección suroeste. El fenómeno meteorológico ha tenido una duración de pocas horas.

Bibliografía consultada y referencias

- AGROCABILDO (2010); Estudios climáticos de Tenerife [En línea]. Cabildo de Tenerife, [ref. de 1 Octubre 2011]. Disponible en Web: www.agrocabildo.es
- AGROCABILDO (2010); Precipitación de niebla en Santa Cruz de Tenerife [En línea]. Cabildo de Tenerife, [ref. de 1 Octubre 2011]. Disponible en Web: www.agrocabildo.org/publica/analisis-climatico/precipitacion_en_niebla.pdf
- AGROCABILDO (2010); Los alisos en Tenerife [En línea]. Cabildo de Tenerife, [ref. de 1 Octubre 2011]. Disponible en Web: www.agrocabildo.org/publica/analisisclimatico/alisos_2008.pdf

- AGROCABILDO (2008); Precipitaciones 2008 en Tenerife [En línea]. Cabildo de Tenerife, [ref. de 1 Octubre 2011]. Disponible en Web: www.agrocabildo.org/publica/analisisclimatico/precipitacion2008.pdf
- AGROCABILDO (2008); Humedad relativa del aire 2008 en Tenerife [En línea]. Cabildo de Tenerife, [ref. de 1 Octubre 2011]. Disponible en Web: www.agrocabildo.org/publica/analisisclimatico/humedad2008.pdf
- AGROCABILDO (2008); Radiación Solar directa 2008 en Tenerife [En línea]. Cabildo de Tenerife, [ref. de 1 Octubre 2011]. Disponible en Web: www.agrocabildo.org/publica/analisisclimatico/radiacion2008_1.pdf
- AGROCABILDO (2008); Velocidad del viento 2008 en Tenerife [En línea]. Cabildo de Tenerife, [ref. de 1 Octubre 2011]. Disponible en Web: www.agrocabildo.org/publica/analisisclimatico/velocidad2008.pdf
- AGROCABILDO (2008); Radiación Solar directa 2008 en Tenerife [En línea]. Cabildo de Tenerife, [ref. de 1 Octubre 2011]. Disponible en Web: www.agrocabildo.org/publica/analisisclimatico/radiacion2008_1.pdf
- AGROCABILDO (2008); Evapotranspiración potencial Penman 2008 en Tenerife [En línea]. Cabildo de Tenerife, [ref. de 1 Octubre 2011]. Disponible en Web: www.agrocabildo.org/publica/analisisclimatico/evapotrans2008.pdf
- DIVULGAMETEO (2011); Estudios meteorológicos. Biblioteca digital [En línea]. [ref. de 1 Octubre 2011]. Disponible en Web: www.divulgameteo.es
- DIVULGAMETEO (2009); Situaciones meteorológicas en días lluviosos 2009. Biblioteca digital [En línea]. [ref. de 1 Octubre 2011]. Disponible en Web: www.divulgameteo.es/uploads/Lluvias-Tenerife-Agrocabildo.pdf
- FONT TULLOT, I. (1983). Climatología de España y Portugal. Ed. Instituto Nacional de Meteorología.
- NIMBUS. [En línea]. Conceptos básicos de meteorología sinóptica [ref. de 1 Octubre 2011]. Disponible en Web: www.nimbus.com.uy/weather/pdf/cap11.pdf
- MEDINA ISABEL, M. (1976). Meteorología básica sinóptica. Ed. Paraninfo.
- VIÑAS, JM. (2010). Introducción a la meteorología. Ed. Almuzara.
- WEATHER. Radiosondeos atmosféricos [ref. de 1 Octubre 2011]. Disponible en Web: <http://weather.uwyo.edu/upperair/africa.html>

Relación de autores



Juan Carlos Santamarta Cereza

Doctor en Ingeniería Civil por la UPM (ETSICCP; Hidráulica y Energética), Ingeniero de Montes (UPM), Ingeniero Civil (ULPGC) e Ingeniero Técnico de Minas (UPM), Máster en Ingeniería del Agua por la Universidad de Sevilla.

Profesor de la Universidad de La Laguna en la ETSI Civil e Industrial.

Director de 40 cursos de postgrado en las áreas de ingeniería del terreno, hidráulica y energética. Participación en 9 Proyectos Europeos.

Director del grupo de investigación INGENIA. Responsable de 7 proyectos de innovación docente.

Decano del Colegio de Ingenieros de Montes en Canarias.

Asesor y consultor en materia de I+D+i en empresas de la Administración Pública y sector privado.

Participación en 34 congresos científicos y numerosas publicaciones en materia de recursos hídricos, forestales y energéticos. Profesor colaborador de las Universidades de Azores, UPM, Barcelona, Sevilla, A. Nebrija y U. Complutense en Madrid.

Fundador y responsable del Centro de Documentación e Investigación aplicada, Biblioteca del Agua de Canarias. Premio a la innovación docente en 2013.

jcsanta@ull.es



María del Carmen Cabrera Santana

Licenciada y Doctora en Ciencias Geológicas por la USAL

Hidrogeóloga en el IGME y en la Dirección Gral. de Aguas del Gobierno de Canarias hasta 1995.

En la actualidad, profesora Titular de Universidad adscrita al Dpto. de Física de la ULPGC.

Directora de la línea de investigación en Hidrogeología del Grupo GEOVOL de la ULPGC.

mcabrera@dfis.ulpgc.es



Emilio Custodio Gimena

Profesor Emérito, Correspondiente de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Doctor Honoris Causa por la Universidad de Tucumán (Argentina).

Más de cuarenta años de experiencia profesional e investigadora. Campos preferentes de actividad internacional: hidrología subterránea/hidrogeología, hidrogeoquímica e isotopía ambiental, recursos de agua, técnicas nucleares. Editor o coeditor de veinticinco libros y autor o coautor de más de quinientos artículos y comunicaciones. Director de veinticinco tesis doctorales.

Emilio.Custodio@upc.edu



Sebastian N. Delgado Díaz

Doctor en Ciencias Químicas

Catedrático de Universidad de Ingeniería Química

Profesor Emérito de la Universidad de La Laguna. Islas Canarias.

Director del Grupo de Investigación: "Tratamientos y Reutilización de Aguas", de la ULL.

Académico de la Academia Canaria de Ciencias

Académico de la Academia de Ciencias e Ingenierías de Lanzarote.

Miembro de diversas sociedades internacionales relacionadas con el agua, su calidad, su tratamiento y su reutilización.

Director y ponente de numerosos Masters y cursos de Tratamientos avanzados y reutilización de aguas regeneradas.

sdelgado@ull.es



Jaime J. González González

Licenciado en Geografía e Historia (especialidad Geografía) por la ULPGC

Máster de Urbanismo y Ordenación del Territorio (MUOT/Madrid)

Especializado en la investigación etno-histórica de la construcción de las grandes presas de embalse de Gran Canaria y Canarias

Desde 2004 ha publicado varios artículos y libros sobre el tema.

Vocal Colaborador del Comité Nacional Español de Grandes Presas (SPANISH COMMITTEE ON LARGE DAMS - SPANCOLD)

jaimegonzalez@presasengrancanaria.com



Arturo Hardisson de la Torre

Catedrático de Toxicología de la Universidad de La Laguna
Doctor en Farmacia, Académico de Número de la Real Academia de Medicina del distrito de Canarias.

Doscientos artículos publicados (70 en revistas internacionales).
Veinticinco Tesis Doctorales Dirigidas.

Farmacéutico Especialista en Análisis y Control de Medicamentos y Drogas.
Vocal de Alimentación del Colegio Oficial de Farmacéuticos de Santa Cruz de Tenerife.

Vocal de la Junta Directiva Nacional de la Asociación Española de Toxicología.

atorretox@gmail.com



Luis Enrique Hernández Gutiérrez

Licenciado en Ciencias Geológicas por la Universidad de Granada y
Diploma de Estudios Avanzados por la Universidad de La Laguna.

En la actualidad Jefe de la Sección de Geotecnia de la Consejería de Obras
Públicas, Transportes y Política Territorial del Gobierno de Canarias.

Más de 20 años de experiencia en el campo de la Geotecnia de
terrenos volcánicos, realizando actividades de: Redacción de
proyectos, asistencia técnica y control de calidad de las Obras
Públicas y de la Edificación; organización y dirección de eventos
formativos y divulgativos; autor de publicaciones, normativa, edi-
ción de libros y comunicaciones a congresos.

Creador de la Litoteca de Canarias.

luisenrique.hernandezgutierrez@gobiernodecanarias.org



Cintia Hernández Sánchez

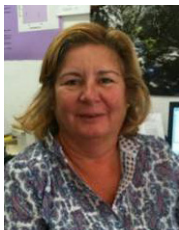
Licenciada en Ciencias Ambientales e Ingeniera Técnica de Obras
Públicas (especialidad en Hidrología). Máster en Ingeniería del
Agua y Máster en Gestión de Recursos Hidráulicos (por la Univer-
sidad Hogeschool Zeeland (Holanda).

Ha participado en varios proyectos de investigación y ha publicado más
de una decena de artículos en revistas nacionales e internacionales.

Ha participado con numerosas comunicaciones en congresos
nacionales e internacionales relacionados con el agua y el medio
ambiente.

Desde el año 2005 lleva desempeñando su labor de investigación en el Área de Toxicología de la Universidad de La Laguna.

cintiahersan@gmail.com



Carmen Concepción Jiménez Mendoza

Doctora en Biología. Profesora Titular de Edafología y Química Agrícola adscrita al Dpto. de Edafología Y Geología de la Universidad de La Laguna, del que es directora en la actualidad. Miembro del grupo de investigación de Recursos de Suelos y Aguas de la ULL. Entre sus líneas de investigación se encuentran los estudios de desertificación y de los agrosistemas tradicionales conservadores de suelo y agua. Ha participado y/o dirigido 15 proyectos de investigación en convocatoria pública tanto nacionales como europeos y 28 contratos de investigación con empresas y/o administraciones. Ha publicado numerosos artículos en revistas de impacto, capítulos de libro y libros así como presentado comunicaciones en congresos de ámbito nacional e internacional relacionados con la dinámica del agua y los suelos volcánicos.

cacojime@ull.es



Jonay Neris Tomé

Licenciado en Ciencias Ambientales y Doctor en Biología.

Investigador contratado en el Dpto. de Edafología y Geología de la Universidad de La Laguna. Su trabajo se centra en la caracterización de la hidrología superficial de los suelos de origen volcánico. Ha participado en más de una docena de proyectos de investigación relacionados con la edafología. Posee varios artículos publicados en revistas de relevancia internacional, capítulos de libros y numerosas aportaciones a congresos de tanto ámbito nacional como internacional relacionadas con la edafología y la hidrología del suelo.

jneris@ull.es



Luis Manuel Pérez Santana

Licenciado en Ciencias Físicas (especialidad en física del aire) por la Universidad Complutense de Madrid.

Antiguo Técnico del ICONA. Fue becario del INIA (Tenerife) e INRA (Avignon).

Numerosos documentos publicados en Agrocabildo, Museo de la Naturaleza y el Hombre y Divulgameteo (RNE) relacionados con

la meteorología. Destacan sus trabajos sobre la precipitación horizontal y la meteorología de la isla de Tenerife.

luissp2006@gmail.com



Jose Antonio Rodríguez Losada

Doctor en Ciencias Geológicas por la Universidad Complutense de Madrid.

Desde el comienzo de su actividad universitaria, trabajó en temas relacionados con el campo de la volcanología. Posteriormente, empezó a compartir la investigación en volcanología con la actividad en el campo de la Geología Planetaria y desde 2003 en el campo de la Geotecnia mediante la participación en varios proyectos de investigación y asistencias técnicas. Sus publicaciones abarcan fundamentalmente temas de Volcanología, de Geología Planetaria y de Geotecnia.

jrlosada@ull.edu.es



Jérica Rodríguez Martín

Diplomada en Estudios Avanzados por la UPM. Departamento de Ordenación del Territorio, Urbanismo y Medio Ambiente. Área de Puertos.

Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos.

Ingeniera Técnica de Obras Públicas, especialidad Hidrología.

Máster en Ingeniería del Agua por la Universidad de Sevilla

Jefa de Oficina Técnica en Empresa Constructora.

jrodriguezingenieria@yahoo.es



Francisco Suárez Moreno

Maestro de Enseñanza Primaria y profesor de Geografía e Historia en Secundaria jubilado tras 42 años de servicio activo.

Cronista Oficial de La Aldea de San Nicolás.

Autor de una veintena libros y de un centenar de artículos sobre Historia y Patrimonio Cultural con especial dedicación a temas del agua, etnohistoria, arqueología industrial, medio ambiente y didáctica.

fsuarez@telefonica.net



Amanhuy Suárez Pérez

Licenciado en Ciencias Ambientales. UAX. Madrid.

Máster Prevención de Riesgos Laborales.

Máster en Dirección y Gestión de Empresas (MBA)

Auditor Lloyd's Register Quality Assurance en Canarias.

Ha publicado varios trabajos sobre aspectos ambientales de la desalación y aguas y de patrimonio etnográfico.

amanhuy.suarez@lr.org



Marisa Tejedor Salguero

Doctora en Biología por la ULL, Catedrática de Edafología y Química Agrícola. Ha ocupado distintos cargos en el ámbito universitario y en la administración en la Comunidad Autónoma: Vicerrectora de Investigación (1986-1990), Rectora de la ULL (1990-1995) y Consejera de Industria, Comercio y Nuevas Tecnologías del Gobierno de Canarias (2005-2007). Presidenta del Comité Científico Nacional del MaB. Su dilatada experiencia científica se plasma en numerosas publicaciones en revistas especializadas y en libros y capítulos de libros en el campo de los Recursos de Suelos y Aguas (140), comunicaciones a congresos nacionales e internacionales (120), dirección de proyectos de investigación (40), dirección de tesis doctorales, participación en comités y representaciones internacionales.

martesa@ull.es



Eustaquio Villalba Moreno

Eustaquio Villalba Moreno es licenciado en Geografía e Historia y catedrático de Enseñanzas Medias. Ha sido profesor de la Escuela de Magisterio de Las Palmas de Gran Canaria y del Departamento de Geografía de la Universidad de La Laguna. Entre sus publicaciones se encuentran varias relacionadas con el agua en Canarias: El Cultivo del Tomate en Gran Canaria y Tenerife, La Cultura del Agua en La Gomera y artículos en la prensa local. Ha participado con ponencias sobre el agua en las universidades de verano de La Palma y de La Gomera y ha colaborado como experto en jornadas organizadas por el Consejo Insular de Aguas de Tenerife y como ponente en varios cursos universitarios dedicados a la Hidrología.

HIDROLOGÍA Y RECURSOS HÍDRICOS EN ISLAS Y TERRENOS VOLCÁNICOS

Métodos, Técnicas y Experiencias en las Islas Canarias

La islas volcánicas tienen una geología singular que condiciona enormemente la forma de aprovechar los recursos hídricos, que en general es más compleja que en los territorios continentales. El agua en las islas volcánicas es un activo fundamental para el desarrollo económico y vital de sus habitantes. Canarias es uno de los lugares del mundo donde más conocimiento se tiene sobre sus aguas subterráneas y los recursos hídricos en general, pero obviamente hay muchas cosas todavía por hacer e investigar. Los esfuerzos en investigación e ingeniería que se han realizado en las islas Canarias para disponer de unos recursos hídricos en cantidad y calidad suficientes han sido muy importantes a lo largo de la historia. Esos avances tecnológicos pueden ser transferidos a otras regiones insulares con menor disponibilidad de recurso, de ahí que Canarias tiene una oportunidad histórica de liderar a nivel mundial la gestión y aprovechamiento de los recursos hídricos en terrenos volcánicos.

La presente obra se divide en 23 capítulos, y abarcan el ciclo integral del agua en una islas volcánica, desde conceptos básicos de geología y vulcanismo hasta su gestión y aprovechamiento. El libro es de interés para académicos, ingenieros, consultores, y profesionales vinculados con la hidrología y el aprovechamiento de aguas en terrenos volcánicos.

El coordinador y autor de parte de la obra; Juan Carlos Santamarta Cereza es Doctor Ingeniero Civil por la UPM e Ingeniero de Montes, Premio en Innovación Educativa 2013, atesora una experiencia notable en la divulgación científica y como profesor y director de más de 40 cursos universitarios relacionados con el agua en medios insulares en varias Universidades Españolas y Europeas, fundador de la Biblioteca y Centro de Investigación Aplicada sobre el Agua en Canarias nos transmite en sus textos, su pasión por un tema como el agua y su aprovechamiento sostenible que, sin duda alguna, es clave para Canarias y cualquier territorio insular y volcánico.



ISBN 978-84-616-3858-1



9 788461 638581 >